
LIBRARY

LA
TERRE ARABLE

DU MÊME AUTEUR

LA TECHNIQUE DES ENGRAIS

Un fort volume in-12 de 430 pages, broché. — Prix : **4** fr. **50.**

On doit à M. Dumont de très nombreux et intéressants travaux sur la chimie du sol et des engrais. Les remarquables ouvrages qu'il a publiés : *La Terre arable*, *Les Matières humiques du sol*, *Les Sols humifères* et *Les Engrais humiques*, sont d'une documentation serrée et originale. *La Technique des Engrais* obtiendra le plus grand succès auprés de tous ceux qui s'intéressent aux choses agricoles. Ce livre ne ressemble en rien aux traités ordinaires ; il est conçu suivant un plan très méthodique, et dans chaque chapitre — à chaque page même — on voit apparaître les traits personnels de l'auteur.

Après avoir consacré la première partie à la *production végétale*, M. Dumont examine les diverses *sources d'approvisionnement* (énumération et description des matières fertilisantes utiles au cultivateur) ; la troisième et la quatrième partie sont consacrées à la *technique des fumures* et à la *pratique des engrais*. C'est là surtout le côté intéressant de l'ouvrage.

Toute la science des engrais s'y trouve exposée en un style clair et agréable : transformation des engrais dans la terre, modes d'action, efficacité, etc... La *Technique des engrais* est certainement l'un des plus beaux ouvrages que l'on ait publiés sur la fertilisation du sol.

Par l'ensemble de ses publications, qui lui font le plus grand honneur, M. Dumont se classe parmi les maîtres les plus éminents de l'agronomie française et étrangère. Le nouvel ouvrage sera bien accueilli dans le monde rural, et fort apprécié par tous les hommes compétents.

En préparation :

LA FERTILISATION DU SOL

LA PRATIQUE DES FUMURES

LA CHIMIE VÉGÉTALE

ENCYCLOPÉDIE DE L'AGRICULTURE ET DES SCIENCES AGRICOLES

Chimie agrologique

LA TERRE ARABLE

PAR

J. DUMONT

DIRECTEUR DE LA STATION AGRONOMIQUE
PROFESSEUR DE CHIMIE AGRICOLE A L'ÉCOLE NATIONALE
D'AGRICULTURE DE GRIGNON

Deuxième édition.



PARIS (VIe)
LIBRAIRIE DES SCIENCES AGRICOLES
Charles AMAT, Éditeur
11, rue de Mézières, 11

1909

LES MATIÈRES HUMIQUES DU SOL

In-8°. — Prix : **2** fr. **50.**

Généralités. — Production de l'Humus. — Constitution de l'Humus. — Propriétés de l'Humus. — Minéralisation de l'Humus. — Rôle des matières humiques. — Humates et Humophosphates. — Théorie de la fertilité. — Conclusions.

LES ENGRAIS HUMIQUES

In-8°. — Prix : **1** franc.

Considérations générales.
  Définitions.
  Classification des Engrais humiques.
Le Fumier de Ferme.
  Fabrication du fumier.
  Composition du fumier.
  La matière noire.
Les Engrais humiques.
  Aperçu général.
  Engrais humiques complets.
  Engrais humiques incomplets.
    a) Engrais humopotassiques.
    b) Superphosphate humique.
    c) Humophosphate calcique.
Efficacité des Engrais humiques.
  Aperçu général.
  Nature des Engrais employés.
  Essais culturaux.
  Action comparée du fumier et des engrais humiques.
  Comparaison du superphosphate humique et du superphosphate minéral.
  Capacité nitrifiante des engrais humiques.
  Emploi des Engrais humiques.
  Conclusions.

LES SOLS HUMIFÈRES

CONSTITUTION, AMÉLIORATION & CULTURE

des Terrains tourbeux, des sols de défrichement et des Landes riches en matières organiques.

In-8°. Prix : **2** fr. **50**

COMPTE RENDU

des travaux exécutés à la Station agronomique de Grignon

Brochure in-8°, 67 pages. — Prix : **1** franc.

ÉTUDES AGROLOGIQUES

Constitution du sol. — Analyse minéralogiques des terres arables. — Dosage intégral et répartition de la chaux. — Répartition de la potasse dans la terre arable. — Action des composés calciques sur la mobilisation de la potasse. — Mobilisation de la potasse du sol. — Action des carbonates alcalins sur la perméabilité. — Solubilisation des phosphates rétrogradés.

INTRODUCTION

I

« *Le fondement de l'agriculture est la connaissance des terroirs que nous voulons cultiver.* » Cet aphorisme énoncé par Olivier de Serres, en l'an 1600, n'a rien perdu de sa force. Il semble même que les nouvelles découvertes réalisées dans l'ordre des *sciences agrologiques* (1) lui donnent une consécration encore plus effective. Mais il ne s'ensuit pas que nos conceptions modernes sur la nature, la constitution et le rôle du sol soient de tous points identiques à celles qu'on avait autrefois.

Au temps d'Olivier, comme à l'époque de la domination romaine, la connaissance « des terroirs » reposait exclusivement sur les *qualités physiques* et la *productivité* naturelle du sol.

(1) D'après De Gasparin, l'*agrologie* est une science technologique ayant pour objet l'étude du sol en rapport avec ses produits. Nous distinguons aujourd'hui : l'*agrologie générale,* qui étudie le sol en lui-même, et l'*agrologie spéciale* ou *descriptive,* qui s'occupe plus spécialement de la description des différents terrains agricoles.

Tout l'art du laboureur dépendait alors de l'habileté qu'il déployait dans l'exécution du labour et du soin avec lequel il choisissait le moment propice pour « prendre la terre ».

Depuis, une évolution considérable s'est produite. En moins d'un siècle, les progrès incessants de la *chimie*, de la *géologie*, de la *minéralogie*, ont bouleversé les opinions anciennes. Et si la terre arable nous apparaît aujourd'hui sous un tout autre aspect, il n'en est pas moins utile de bien marquer au passage chacune des étapes parcourues... Rien ne montre mieux cette marche ascendante que l'exposé des *systèmes de classification* qui ont été adoptés ou préconisés aux différents âges.

II

Les premiers hommes qui se livrèrent à la culture étaient profondément ignorants ; mais si rien ne pouvait les guider sur le choix des terrains, l'aspect de la végétation et la manière d'être du sol les conduisirent inévitablement à distinguer bientôt des groupes ou catégories de terres plus ou moins *fertiles*, *grasses*, *meubles* et *faciles* au travail. Une *agrologie* primitive et toute rudimentaire naquit ainsi... Elle se perpétua à travers les siècles, toujours sous la même forme, aussi longtemps qu'on

se borna à l'observation des *caractères extérieurs* qui sont les plus apparents.

Dès lors, en effet, les *caractères physiques* et *culturaux* servirent de base à toute classification, et c'est bien en vain que WARON s'efforça de faire adopter un système plus rationnel tiré de la constitution mécanique ou minéralogique du sol.

Avec COLUMELLE et CATON, deux courants d'opinions se dessinent nettement... Et tandis que COLUMELLE établissait huit classes de terres : les unes *grasses*, les autres *maigres* — meubles ou fortes, humides ou sèches, — CATON distinguait déjà des terres à *vignes*, à *jardins*, à *saussaies*, à *olivettes*, à *prairies*, à *blé*, à *bois*, à *vergers* et à *chènevières*... On voit par là quel puissant intérêt on attachait alors aux qualités extrinsèques du sol.

Il se peut que les *caractères physiques*, sur lesquels repose la classification de COLUMELLE, aient joui des faveurs premières... Mais il semble que les agriculteurs, dans la suite, sans méconnaître la valeur des qualités physiques, soient revenus au système de CATON... De fait, les *caractères culturaux* constituent un moyen d'appréciation autrement certain, et l'on conçoit qu'ils aient longtemps prévalu à l'exclusion de tous autres.

III

Nous voici au début du XIXe siècle. La science progresse et les idées se modifient considérablement. De nouveaux ouvrages agricoles font leur apparition. THAËR publie ses *Principes d'agriculture ;* il esquisse une nouvelle classification des terres... Nouvelle ? Non ! C'est celle de CATON simplifiée ou considérablement réduite. Nous n'avons plus que des terres à *froment,* à *orge,* à *seigle* et à *avoine*... KREISSIG ne fait guère mieux en distinguant des *terres à céréales d'hiver* et des *terres à céréales de printemps,* des *terres à froment,* où l'argile domine, et des *terres à seigle,* peu argileuses, qui ne se crevassent pas, et dont les mottes se divisent facilement.

Avec MOLL, les caractères culturaux entrent encore en ligne de compte ; on ne table plus sur les céréales, mais sur les fourrages, et nous avons des *terres à luzerne,* à *sainfoin,* à *trèfle ordinaire* et à *trèfle blanc,* de première, de deuxième et de troisième classe. Déjà, cependant, les *classifications mixtes* sont ébauchées. On connaît quelques propriétés essentielles des composants mécaniques des terres ; on sépare, par lévigation, des *éléments gros* analogues au sable, et des *éléments fins* semblables à l'argile ; on sait que

les acides décomposent le *calcaire* avec dégagement d'acide carbonique... Ne parle-t-on pas aussi des caractères de la silice, de l'alumine, de l'oxyde de fer. de la magnésie, de la chaux, des alcalis, de l'humus ou terreau ? Sans doute, THAËR ignore la constitution chimique de tous ces corps ; mais on sait en séparer quelques-uns, et il n'en faut pas davantage pour appeler l'attention sur la nomenclature agrologique.

Un jour nouveau se lève... Dans son *Guide du Fermier,* Arthur YOUNG, prenant pour base les caractères physiques et minéralogiques, distingue des *terres compactes,* motteuses et friables ; des *sols graveleux,* froids et humides, secs et chauds ; des *sols sablonneux,* légers et compacts ; des *sols crayeux* et *marécageux*... DE GASPARIN n'hésite pas à formuler un système de classification plus hardi que celui de YOUNG ; il distingue les *sols calcaires,* les *sols non calcaires,* les *argiles* et les *terreaux;* il rattache à ces différents types : les *limons* ou *terres franches,* les *terres argilo-calcaires, crayeuses, sableuses, siliceuses* et *glaiseuses,* les *terreaux doux* et *acides.* Nous voilà déjà en présence des *sols simples* et des *sols composés.* Les caractères minéralogiques subsisteront désormais, et la nomenclature des terres reposera exclusivement sur les données de l'analyse mécanique ou physique, c'est-à-dire sur la prédominance des

composants essentiels du sol : *sable, argile, calcaire* et *humus*.

La classification de MASURE, adoptée par la plupart des agronomes modernes, ne pouvait avoir de meilleure base. N'avais-je pas raison de le dire : les divers modes de groupement des terrains ne reflètent-ils pas les progrès de l'agrologie, l'idée qu'on se faisait du sol aux différentes époques de notre histoire ?

IV

Le sol est l'atelier du cultivateur. C'est le milieu qui se prête le mieux et le plus efficacement à notre intervention : nous pouvons toujours, en l'améliorant, modifier sa nature et accroître sa productivité..... Tant qu'on a cru qu'il servait exclusivement de support aux plantes, tant qu'on lui attribuait un *rôle passif* dans la nutrition végétale, la connaissance des terrains pouvait être reléguée au second plan... Mais, aujourd'hui, qui donc oserait méconnaître l'utilité des études agrologiques ? A quelque point de vue qu'on l'envisage, le rôle du sol nous apparaît capital.

Tous les agriculteurs savent que les terres qu'ils exploitent sont inégalement riches en principes fertilisants, qu'elles diffèrent sensiblement par leur nature, leur constitution et

leurs propriétés essentielles ; ils n'ignorent pas que sans le secours des engrais — qui suppléent de façon heureuse à l'insuffisante richesse du sol — ils obtiendraient de bien maigres récoltes dans les milieux relativement pauvres.

Mais pourquoi tel terrain se montre-t-il inégalement fertile ? Pourquoi tel autre nécessite-t-il l'apport des amendements ou des engrais ? Comment les diverses matières fertilisantes se transforment-elles dans le sol qui les reçoit ? Pour quelles raisons, enfin, les mêmes substances ne produisent-elles pas toujours les mêmes résultats ? Ces multiples questions, longtemps, ont paru insolubles... On essayait vainement de les interpréter. Et si les explications données sont demeurées parfois imprécises ou vagues, il ne s'ensuit point que la science agrologique soit impuissante à nous renseigner utilement.

Il ne suffit pas d'éluder les difficultés d'interprétation en invoquant l'inégale aptitude d'assimilation des espèces végétales cultivées, il faut serrer de plus près les données du problème. A la vérité, on connaît mal la chimie du sol, la *chimie agrologique ;* on se fait une fausse idée de la fécondité au point de vue théorique ; l'*activité chimique* de la terre arable, qui est la résultante de sa constitution et de ses propriétés, nous apparaît capricieuse

et pleine de mystères. Des réactions incessantes se produisent à notre insu, dans ce milieu hétérogène qu'est le sol, et aboutissent à des équilibres, à des limites encore insaisissables.

Pour pénétrer ces secrets, il est indispensable de décomposer la terre en ses éléments, de la disséquer en quelque sorte. Or, jusqu'à ce jour, qu'a-t-on fait ? On a séparé la terre fine, les cailloux, puis les composants mécaniques de la terre fine... Et pour apprécier la *richesse chimique*, on a dosé, sur ce mélange de terre fine, l'azote, la potasse, l'acide phosphorique..., sans s'inquiéter de la ténuité pourtant si différente des sables, de l'argile et des matières humiques ! S'est-on préoccupé davantage de la *constitution minéralogique ?* Non ! Et l'admirable page écrite sur ce sujet par De Gasparin devait rester lettre morte jusqu'à ces derniers temps.

V

Voulez-vous savoir maintenant l'idée qu'on se fait de la terre arable ? Consultez les recueils spéciaux, questionnez les agriculteurs qui savent le plus de choses, et tout ce que vous apprendrez se résumera en ceci : « La terre est un mélange essentiellement composé de sable, d'argile, de calcaire et d'humus... associés en proportions très variables, ce qui con-

duit à distinguer des SOLS SIMPLES *siliceux, argileux, calcaires* et *humifères*, ainsi que des SOLS COMPOSÉS *sablo-argileux* et *argilo-sableux*, *argilo-calcaires* et *calcaro-argileux, silico-humifères* et *humo-siliceux,* etc... En raison de leur constitution, ces sols sont plus ou moins meubles, perméables, consistants, forts, légers, humides et froids... Au point de vue chimique, ils renferment des quantités variables d'azote, d'acide phosphorique, de chaux et de potasse... Ils sont, enfin, inégalement fertiles... » Si vous poussez plus loin votre curiosité, vous apprendrez encore que « les matériaux constitutifs du sol n'ont pas la même origine; que la partie minérale (représentée par le sable, l'argile et le calcaire) résulte de la décomposition ou du morcellement des roches qui formaient la surface de l'écorce terrestre ; que cette décomposition est due à des actions mécaniques, physiques et chimiques; que le sable provient du quartz et l'argile du feldspath... Vous saurez enfin que l'humus est un résidu de la putréfaction ou de la dégradation des matières organiques, et qu'il est susceptible de céder son azote à la plante après une nitrification préalable.

« Ajoutez à tout cela des noms et des chiffres, des hypothèses et beaucoup « d'à peu près », et vous serez un aiglon — presque un aigle — en agrologie. Si l'on vous demande ensuite

pourquoi les engrais agissent sur un sol donné, vous répondrez imperturbablement : parce que l'analyse chimique accuse moins d'un millième d'azote, d'acide phosphorique et de potasse... Ce faisant, vous vous conformerez aux données officielles... Et si quelqu'un vient affirmer que les engrais azotés marquent sur des sols humifères dosant beaucoup d'azote (10 à 20 pour 100); que la potasse agit efficacement sur des terres granitiques, tandis qu'elle ne produit aucun effet sur d'autres sols réputés pauvres d'après leur origine géologique ; que les superphosphates sont à conseiller dans les terrains non calcaires..., regardez votre interlocuteur, et bien que ses affirmations soient en opposition avec ce que vous avez appris, s'il vous interroge, gardez-vous de lui jeter la pierre... Au demeurant, rappelez-vous la belle pensée du Duclaux : *C'est parce que la science n'est sûre de rien qu'elle avance toujours.* »

Je me suis inspiré de cette grande vérité pour écrire ce livre... Et si j'ai poussé plus à fond la connaissance du sol, si ma conception de la terre arable présente sur certains points quelque originalité, tout le mérite en revient aux Maitres dont les remarquables travaux ont élargi considérablement le cercle de mes idées.

LA TERRE ARABLE

I

LA FORMATION DU SOL

Une masse rocheuse superficielle s'effrite ou se pulvérise : elle devient discontinue et accessible aux agents extérieurs ; elle offre aux plantes un support meuble où les racines peuvent s'étendre : voilà le *sol primitif*. Dans ce sol, essentiellement minéral, que trouvons-nous ? Des fragments rocheux mêlés aux composants minéraux de la roche mère qu'un travail de division plus parfait a déjà séparés. Il n'y a là que des *éléments originels*. Peu à peu, la décomposition chimique se manifeste : des minéraux altérables sont modifiés par dissolution, par oxydation, par carbonatation ; il se fait alors de nouveaux corps *(argile* et *calcaire)* ayant une composition et des propriétés chimiques différentes : ce sont des *éléments dérivés*. Supposons maintenant qu'une végétation cryptogamique ou autre s'empare du terrain et qu'elle meure sur place ! Des débris d'êtres organisés s'incorporent à la masse ; l'humus apparaît, et voilà notre sol primitif transformé en *sol végétal*.

Tout ce travail s'est accompli lentement, au cours des siècles, par étapes successives et lointaines cor-

respondant à ces grandes périodes géologiques auxquelles nous rattachons : la consolidation des roches, la formation des terrains sédimentaires — qui fut troublée par des éruptions intermittentes donnant lieu parfois à des phénomènes métamorphiques — et l'apparition de la vie.

Au point de vue agrologique, un fait domine tous les autres : ce sont les roches superficielles de l'écorce terrestre qui ont engendré le sol. Quelles étaient ces roches ? Comment se sont-elles transformées ou désagrégées ? Par quel mécanisme les masses rocheuses, primitivement dures, compactes et continues, comparables à celles que nous rencontrons dans les profondeurs ou qui apparaissent sur le flanc des montagnes, ont-elles pu former ces particules terreuses où l'on retrouve encore, sous forme de *composants sableux,* des espèces minérales parfaitement reconnaissables et de tout point identiques à celles qui composent les roches ? Pour pénétrer le mystérieux travail qui s'est effectué, pour bien en saisir le sens, il faut nécessairement que nous étendions nos connaissances géologiques, minéralogiques et pétrographiques (1).

I. — Étude des masses rocheuses.

Origine des roches. — On admet que le globe terrestre, à l'origine, était constitué par une masse fluide entourée d'une atmosphère épaisse de gaz et de vapeurs. Peu à peu, à la suite de refroidissements successifs, de profonds changements se produisirent dans les régions périphériques : de séléments gazeux

---

(1) La *minéralogie* a pour objet l'étude des minéraux constitutifs des roches ; la *pétrographie* (de pétros, pierre) s'occupe plus spécialement des roches elles-mêmes.

s'unirent, des vapeurs atmosphériques se condensèrent, et l'oxygène libre se fixa sur les corps légers qui flottaient à la surface du bain. Le *carbone*, le *sodium*, le *magnésium*, l'*aluminium*, le *silicium*, le *potassium*, le *calcium*, le *fer*, etc., engendrèrent alors des composés oxygénés divers : *acide carbonique*, *soude*, *magnésie*, *alumine*, *silice*, *potasse*, *chaux*, *oxyde de fer*. Et tandis que le gaz carbonique s'écoulait dans l'atmosphère, la *silice* ou *acide silicique* — en raison de sa grande fixité — se combinait aux *oxydes métalliques* (1) pour former cet ensemble de *minéraux silicatés* dont la consolidation aboutit ultérieurement à la formation des *roches primitives* ou *originelles*.

Dès lors, une mince couche solide enveloppa le globe ; mais l'épaisseur de cette enveloppe était encore trop faible pour résister aux mouvements continuels de l'énorme masse fluide qu'elle enserrait. Des contractions, des ruptures se produisirent grâce auxquelles les matières pâteuses s'épanchèrent au dehors pour former les *roches éruptives*. D'autre part, la précipitation des vapeurs atmosphériques ne tarda pas à provoquer les *phénomènes de sédimentation* qui engendrèrent les *terrains de transport*. Ainsi prirent naissance les différentes masses rocheuses.

Classification des roches. — Les roches se partagent naturellement, d'après leur origine, en deux grandes catégories : les *roches ignées* et les *roches sédimentaires*. Tandis que les premières sont le produit de la consolidation des matières fluides internes — ce qui leur vaut d'être nommées aussi *roches endogènes* — les secondes sont, au contraire, des produits de remaniement résultant des actions exercées sur les roches ignées par les agents de la dynamique externe ; elles constituent les *roches exogènes*.

---

(1) Nous désignons ainsi l'alumine, la chaux, la potasse, la soude, la magnésie, etc.

a) **Roches ignées.** — On peut les subdiviser en trois groupes : les *roches abyssales* ou plutoniennes, les *roches hypabyssales* ou de filons, et les *roches superficielles* ou volcaniques.

Aux ROCHES ABYSSALES à grains uniformes se rattachent : les *granites,* qui sont formés de feldspaths, de quartz et de micas ; les *diorites,* qui sont composées de feldspath sodico-calcique et de hornblende ; les *syénites,* où des feldspaths alcalins sont associés à des éléments ferromagnésiens ; les *gabbros*, à base de pyroxène et de feldspath plagioclase ; les *péridotites*, dont l'élément dominant est l'olivine ou péridot. Toutes ces roches sont *holocristallines,* c'est-à-dire essentiellement composées de minéraux cristallisés, sans résidu vitreux. Leur consolidation s'est faite à de grandes profondeurs et en un temps (1), par refroidissement lent, d'après la loi de basicité décroissante de ROSENBUSCH. Sauf de rares exceptions, ce sont les minéraux accessoires (apatite, zircon, grenat) qui ont dû se séparer les premiers, puis les éléments ferromagnésiens (olivine, pyroxènes, amphiboles, micas), les minéraux feldspathiques (orthose, labrador, anorthite, oligoclase, albite) et finalement le quartz. Toutes ces roches offrent généralement une structure uniforme à grains plus ou moins fins (texture granitoïde).

Les ROCHES HYPABYSSALES : *porphyres* et *porphyrites, diabases* et *lamprophyres* (2), sont intermédiaires entre les roches plutoniennes et les roches volcaniques. Dans un certain nombre de types, tous les éléments sont cristallisés (*roches holocristallines*) ; il en est d'autres, au contraire, qui renferment à la fois des minéraux cristallisés et des minéraux amorphes ou vitreux (*roches hypocristallines*). Elles présentent toutes des îlots de gros cristaux qui sont caractéristiques de la texture porphyroïde impliquant une consolidation à deux temps.

Les ROCHES VOLCANIQUES : *rhyolites* ou laves acides,

---

(1) Cette consolidation, effectuée à l'abri de tout changement brusque, fait que la texture est uniforme (structure granitoïde).

(2) Ces roches sont caractérisées surtout par l'abondance de biotite (mica noir riche en alcalis).

trachytes (pas de quartz libre), *andésites* (feldspath sodico-calcique et mica) et *basaltes* ou laves basiques, présentent aussi le plus ordinairement la texture porphyroïde, mais elles contiennent toujours un *résidu vitreux* ou dévitrifié. Certains minéraux tels que la *tridymite* (variété de quartz), la *leucite* ou *amphigène* et la *néphéline* (sorte de feldspath), s'y rencontrent exclusivement. Au point de vue chimique, ces roches offrent donc une grande analogie avec les roches abyssales : les *rhyolites* correspondent au *granite*, et les *trachytes*, à la *syénite*.

b) **Roches sédimentaires.** — Elles sont le résultat de la désagrégation des roches ignées. On distingue : les *roches arénacées* (sables, grès et poudingues), les *roches argilacées* (argiles, schistes et phyllades), les *roches calcaires* (grès et tufs calcaires, calcaires magnésiens, oolithiques, etc...) et les *roches pyroclastiques* (poussières et tufs volcaniques). Ces roches ont subi parfois l'action du métamorphisme. A l'exception des grès, du pétrosilex et des calcaires durs, elles se désagrègent très aisément. Comme elles dérivent des roches primitives, il n'y a pas lieu d'étudier plus spécialement leur constitution, qui est excessivement variable d'ailleurs.

Composition des roches. — Les masses rocheuses présentent qualitativement une composition assez simple. On y trouve parfois un excès de silice libre (roches acides) et des éléments silicatés divers : feldspaths, micas, etc. Les espèces minérales qui les constituent sont *essentielles* ou *accessoires*, suivant leur abondance. On distingue trois composants essentiels ou dominants :

1° Les éléments quartzeux,
2° Les éléments feldspathiques,
3° Les éléments ferromagnésiens.

Le *quartz* est de la silice à peu près pure.

Les *feldspaths* sont des polysilicates d'alumine et d'un protoxyde qui peut être la potasse (orthose et

microcline), la soude (albite), la chaux (anorthite), ou un mélange de soude et de chaux (plagioclases divers : oligoclase et labrador).

Les *éléments ferromagnésiens* — ainsi nommés parce qu'ils contiennent toujours du fer et de la magnésie — offrent une constitution différente : les *micas* (mica blanc ou muscovite, mica noir ou biotite) sont des silicates polybasiques où l'alumine est associée à de fortes proportions de magnésie et de fer ; les *pyroxènes* (silicates de chaux et de magnésie) renferment aussi du fer et peu d'alumine ; les *amphiboles* diffèrent du pyroxène par une plus grande richesse en silice ; enfin, le *péridot* ou *olivine* est un silicate de magnésie et de fer.

Parmi les *éléments accessoires* des masses rocheuses, il convient de citer plus spécialement : l'*apatite* (phosphate de chaux cristallisé), le *zircon* (silicate de zirconium), la *calcite* (carbonate de chaux), la *tourmaline* (borosilicate d'alumine, de magnésie, etc.) et les *grenats* (silicates complexes).

La composition centésimale des espèces minérales et des roches les plus répandues serait la suivante :

ESPÈCES ANALYSÉES	SILICE	ALUMINE	CHAUX	MAGNÉSIE	OXYDE DE FER	POTASSE	SOUDE
a) *Mineraux.*							
Quartz	100	»	»	»	»	»	»
Feldspath orthose .	64,2	18,4	»	»	»	17	»
— albite . .	68	19,6	0,7	»	0,2	»	11,8
— anorthite	43,1	36,9	20	»	»	»	»
Mica.	47,5	30	»	»	»	8	1,5
Hornblende.	39	3	10	10	3	»	»
Augite.	49	15	15	27	20	»	»
Olivine	41	»	»	49,2	9,8	»	»
Talc.	63,5	»	»	31,7	2,5	1,8	»

ESPÈCES ANALYSÉES	SILICE	ALUMINE	CHAUX	MAGNÉSIE	OXYDE DE FER	POTASSE	SOUDE
b) *Roches.*							
Gneiss.	71	14	5	»	6	3	2
Granite	68	15	1,1	0,1	2,5	6	7
Granulite	75	14	"	»	1,4	5	6
Porphyre	73	14	0,2	0,7	1,5	8	2
Diorite	57	19	6,2	3,3	7	2,7	4,9
Gabbros	58	19	10	8	11	1	3,5
Trachyte	61	19,5	1,3	0,7	3,3	4,1	10,3
Andésite	59	20,7	4,9	1,7	4,4	2,4	6,7
Basalte	45	16	13	9,6	10,4	1,1	4,5

Ainsi, au point de vue de leur constitution chimique, les minéraux et les roches se ramènent à quelques types bien définis. Ce sont les différences de texture, et la proportion des éléments constitutifs, bien plus que la nature des masses rocheuses, qui justifient la diversité des espèces ou des types. Ici, c'est la silice qui domine ; là, c'est telle variété de feldspath ou de mica ; ailleurs, c'est un silicate alumineux ou magnésien qui se substitue à un autre, etc... En fait, les corps essentiels se retrouvent un peu partout : ce sont les seuls à considérer.

Répartition des roches. — Etant donné que toutes les roches ne sont pas également répandues dans la nature, elles n'ont pu participer au même degré à la sédimentation. C'est pourquoi il paraît utile d'étudier leur répartition. Les *granites,* les *gneiss,* les *micaschistes* et les roches *calcaires, sableuses* ou *argileuses* occupent environ les neuf dixièmes de la surface de l'Europe. Viennent ensuite, par ordre d'importance, les *syénites,* les *porphyres* et l'ensemble des *roches*

volcaniques. Comme les éléments constitutifs des roches sédimentaires proviennent surtout du quartz et du feldspath, ces minéraux sont nécessairement les plus abondants.

D'ORBIGNY estime que 100 parties de la croûte terrestre contiennent approximativement :

48 pour 100 de feldspaths ;
35 pour 100 de quartz ;
8 pour 100 de micas ;
5 pour 100 de talc ;
1 pour 100 d'amphiboles ;
1 pour 100 de carbonates terreux ;
2 pour 100 de minéraux divers.

Ces données numériques montrent bien dans quelle mesure les principaux composants des roches ont pu contribuer à la formation du sol arable ; les feldspaths et le quartz ont fourni 83 °/₀ de matériaux ; si l'on y joint les minéraux *feldspathoïdes* des roches volcaniques (néphéline et leucite) ainsi que les divers *éléments ferromagnésiens*, la participation s'élève à plus de 95 pour 100. Abstraction faite des espèces minérales rares, on peut donc dire que *la partie inorganique du sol* — sous le rapport de sa constitution minéralogique — *est un mélange de feldspaths, de quartz et de mica avec leurs dérivés immédiats.*

II. — Désagrégation des roches.

La terre arable, par sa nature et son état physique, diffère considérablement des roches originelles, qui ont participé à sa formation. Celles-ci, au début, constituaient une croûte continue : comment ces masses rocheuses, malgré leur extrême dureté, se sont-elles réduites en poussière ? Par quel mécanisme,

sous quelles influences ont-elles engendré un sol meuble, friable et facile au travail ? Des causes diverses sont intervenues. Selon toute vraisemblance, les couches superficielles ont dû se fissurer, se fragmenter en refroidissant ; les particules devenues libres ont ensuite subi des altérations de contact d'autant plus intenses que les fragments étaient eux-mêmes plus ténus. Ainsi comprise, la désagrégation des roches comporterait deux ordres de travaux différents :

1° *Un travail physique de fragmentation, de pulvérisation ou d'usure,* aboutissant en fin de compte à la formation de particules d'une extrême petitesse ;

2° *Un travail de décomposition chimique,* presque toujours superficiel, qui se traduit par une altération profonde et parfois très inégale des divers fragments rocheux attaquables.

Il n'y a pas, entre ces actions, de confusion possible. La roche qui se pulvérise spontanément ou par l'action des gelées et des chocs est désagrégée physiquement ou mécaniquement, tandis que les fragments minéraux qui s'altèrent par oxydation, par carbonatation ou par toute autre action chimique se décomposent avec formation d'espèces nouvelles. Ces effets sont-ils simultanés ou consécutifs ? A l'origine, la désagrégation physique se produisit peut-être indépendamment de toute autre cause ; mais, à partir d'un certain moment, la *pulvérisation* et la *décomposition* se manifestèrent simultanément et à des degrés divers pour un même milieu. Il en est ainsi, à l'heure actuelle, dans les sols cultivés, sous l'action combinée de l'usure, du gel et des agents chimiques et biologiques.

Travail physique de pulvérisation. — C'est à des influences mécaniques et physiques qu'il faut attribuer la fragmentation des roches. Chez quelques-

unes d'entre elles, formées à la suite d'un refroidissement brusque, à l'instar des larmes bataviques (1), la pulvérisation s'est produite spontanément sous l'influence du moindre choc. Enfin, d'après FOURNET, certains feldspaths sont passés d'un état moléculaire où leur décomposition était très lente à un état où elle était plus rapide. Il s'est produit dans leur masse un mouvement analogue à celui qui se manifeste quand l'acide arsénieux passe de l'état vitreux à l'état opaque. On observe aussi des phénomènes de rupture dans les laves qui s'épanchent des volcans.

L'*eau* et les *agents atmosphériques* sont intervenus puissamment. Une roche qui se fissure est condamnée à la destruction. L'eau agit sur elle mécaniquement, physiquement et chimiquement ; son action mécanique résulte de sa propre mobilité, de sa force vive : le flot bat la falaise et la ronge progressivement, surtout si la vitesse du courant est assez forte pour projeter des fragments solides qui s'entrechoquent et se pulvérisent (2). On s'explique ainsi comment les débris rocheux, entraînés par des torrents descen-

---

(1) On prépare les *larmes bataviques* en coulant, dans de l'eau froide, du verre en fusion ; il suffit de briser la pointe des ampoules ainsi obtenues pour que toute la masse s'effrite.

(2) Les belles recherches de A. DAUBRÉE sur la formation des galets, du sable et du limon, montrent que les fragments anguleux de granite, et de quartz, etc..., mis en mouvement dans un cylindre horizontal, en présence de l'eau — avec une vitesse variant de 0,80 à 1 mètre par seconde — s'arrondissent rapidement et sont convertis en *galets* après un parcours de 25 kilomètres. Dans ces conditions, les fragments ont perdu les $\frac{4}{10}$ de leur poids ; par le même parcours, les galets (fragments arrondis) ne perdent plus que quelques millièmes par kilomètre. L'usure du silex est bien moins rapide. Le principal produit de l'action mutuelle des fragments rocheux qui se dégradent au sein de l'eau n'est pas le sable, comme on l'a souvent prétendu, mais du *limon*. (Géologie expérimentale, pp. 248 et suivantes).

dant des régions montagneuses, ont subi une action mécanique intense. On trouve, dans la Crau, des fragments pierreux, des cailloux roulés ou *galets* que la Durance a charriés des Alpes jusqu'au bord de la mer.

Au point de vue physique, l'eau agit d'abord comme dissolvant. En pénétrant à l'intérieur de la roche, elle enlève les matières solubles et entraîne les moins résistantes. Enfin, en se congelant, elle fait éclater la masse qu'elle a pu pénétrer. A cet égard, l'influence de la gelée est des plus manifestes. Durant la longue *période glaciaire,* il se produisit un travail considérable de désagrégation. Les glaciers, dans leur course lente, ont provoqué par frottement l'usure des roches encaissantes, et l'on voit encore des *stries* sur le flanc des montagnes qui formaient autrefois les rives de ces fleuves de glace.

Toutes ces actions mécaniques et physiques combinées ont abouti à la production des pierres, des cailloux, des graviers et des sables. Mais elles devaient avoir un autre effet : la mise en liberté des espèces minérales, qui constitue, en somme, l'analyse immédiate de la roche.

Pour bien fixer les idées, considérons un bloc de granit où les grains de quartz, de feldspath et de mica sont très apparents (fig. 1). Il est évident qu'une fragmentation grossière va nous donner des débris rocheux de constitution identique à celle du granit, contenant toutes les espèces minérales de la roche mère. En sera-t-il de même si le travail de division est poussé à l'extrême ? Point ! les grains sableux, à partir d'un certain degré de finesse, ont une constitution minéralogique propre : ils sont *quartzeux, feldspathiques* ou *micacés,* ils ne sont plus essentiellement granitiques.

La désagrégation physique comporte donc, en fait, un travail préliminaire, qui aboutit à la production

de fragments d'une certaine grosseur — où l'espèce roche subsiste intégralement — et un travail définitif, qui conduit à la séparation physique, à la libération des espèces minérales, et à la production des matières limoneuses.

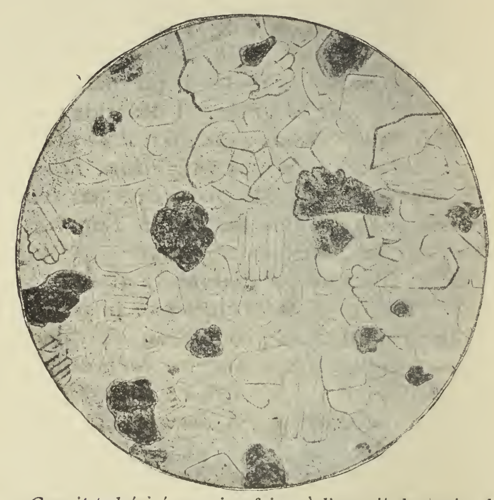


Fig. 1. — *Granit pulvérisé*, grossi 70 fois, où l'on voit des grains de *mica*, les particules striées du *feldspath* et les fragments anguleux du *quartz*.

Pulvérisation humide. — Les masses rocheuses pulvérisées au sein de l'eau acquièrent des propriétés particulières. Elles engendrent parfois un limon très tenu dont les principaux caractères physiques rappellent ceux de l'argile. On connaît l'expérience classique de A. Daubrée montrant que les fragments de feldspath orthose immergés dans de l'eau pure et longtemps triturés par des boulets, dans une sorte de tambour mobile, abandonnent une certaine quantité de potasse et donnent naissance à une matière argileuse. Ainsi, trois kilogrammes de feldspath, après un mouvement prolongé pendant 192 heures (correspondant à un parcours de 460 kilomètres), ont formé

une quantité de limon du poids de 2 kg. 720, et les 5 litres d'eau dans lesquels s'était opérée la trituration contenaient :

Silice	0 gr. 10
Alumine	0 gr. 15
Potasse.	12 gr. 60

La quantité d'alcali qui entre en dissolution représenterait 2 à 3 pour 100 de celle contenue dans la poussière limoneuse (1).

D'autre part, les expériences plus récentes de M. A.-S. Cushmann, montrent que la pulvérisation humide a pour effet d'accroître la force de cohésion ou la puissance d'agglutination des roches pulvérisées, surtout en présence de certains électrolytes (chlorures d'ammonium et de baryum), par suite de la formation de matières amorphes, d'apparence gommeuse, qui constituent un silicate sodique gélatineux (2). Il se produit, en ce cas, une réaction alcaline faible, mais sensible cependant à la phénolphtaléine.

Les recherches que nous avons effectuées — et qui sont relatées plus loin — confirment en partie les observations précédentes. Toutefois, comme le quartz très finement porphyrisé présente la même particularité que les feldspaths, au point de vue physique, nous supposons qu'il se produit une *hydratation moléculaire* ayant surtout pour effet de modifier la densité des particules et de favoriser leur diffusion au sein du liquide en leur donnant des propriétés colloïdales. (Voir actions hydratantes et caractères de l'argile brute.)

Travail de décomposition chimique. — Le sol primitif ne contenait que des fragments rocheux associés à des débris plus fins de quartz, de feldspaths et

(1) *Géologie expérimentale*, pages 271 et suivantes.

(2) U. S. Department of Agriculture. — Bureau of chemistry. *Bulletin*, n° 92.

de micas. Point d'argile, ni de calcaire, ni d'humus! Pas de cohésion apparente! Du sable, un peu de limon et des pierres! Une lande immense : voilà l'œuvre première de la désagrégation physique.

Mais tout n'est pas fini! D'autres actions vont entrer en jeu et provoquer la formation d'éléments nouveaux. En réalité, une activité chimique s'était déjà manifestée antérieurement. Quand les vapeurs de l'atmosphère s'abattirent sur les roches superficielles, l'immense nappe d'eau qui devait, en se retirant sur les parties basses, former les océans et les mers, exerça une action assez intense. Chargée d'acides forts (acide chlorhydrique surtout), la masse liquide réagit énergiquement à la surface des roches qu'elle baignait. Ce travail chimique violent se poursuivit aussi longtemps que l'acidité des eaux persista; il devait en résulter la production d'une énorme quantité de chlorures que nous trouvons actuellement dans les eaux marines. Ensuite, quand les roches émergèrent de nouveau à la surface, lorsque la désagrégation fit son œuvre, les actions chimiques se manifestèrent sous une autre forme. A la première phase de *décomposition chimique active* succéda la seconde phase de *décomposition chimique lente* qui vint parfaire le travail commencé. Ici, plus d'acides violents pour réagir : c'est un acide faible — l'*acide carbonique* — qui devait joindre ses effets à ceux de l'eau, des sels et des agents atmosphériques et biologiques.

Quel fut le sens général de ces diverses actions?

Voilà ce qu'il importe de bien préciser.

Revenons à notre *sol primitif* et voyons comment les espèces minérales originelles ont été modifiées. Le *quartz* étant inaltérable chimiquement, dans les conditions naturelles, nous n'avons à considérer que l'altération — on dit encore *épigénisation* — des mi-

néraux silicatés, c'est-à-dire des *éléments feldspathiques* et *ferromagnésiens.*

Tout d'abord, quelles transformations essentielles ces composés ont-ils subies ? Les voici fragmentés, divisés, et en contact direct avec les agents atmosphériques. Ils sont entourés d'une double enveloppe d'air et d'eau ; dès lors, l'action chimique se trouve nécessairement limitée et restreinte : ce sont les gaz de l'atmosphère seuls qui entrent en jeu, soit qu'ils agissent à l'état libre, soit qu'ils interviennent concurremment avec l'eau qui les tient en dissolution. Parmi ces gaz, l'oxygène et l'acide carbonique exercent surtout une action effective. Comment et à quel quel degré va se manifester leur intervention ?

1° **Actions hydratantes.** — Des espèces pures : quartz, orthose, labradorite, albite, etc., finement porphyrisées au mortier d'agate et mises en immersion dans l'eau (après tamisage au tamis de soie n° 240), restent en suspension au sein du liquide. Si l'on dose l'humidité dans la matière primitive, puis dans les produits décantés — avant et après précipitation — on trouve des différences considérables.

Il semble donc que les particules minérales subissent une hydratation profonde : elles se gorgent d'eau, changent de densité et acquièrent, de ce chef, la plupart des propriétés inhérentes aux colloïdes minéraux. — Comme l'argile, on peut les précipiter par les acides et les sels alcalino-terreux dissous. — Selon toute vraisemblance, des actions hydratantes semblables se sont produites naturellement dans la pulvérisation humide des roches, et nous avons tout lieu de croire que l'argile dosée par Daubrée représenterait plutôt des molécules d'orthose hydraté ou

en état de *turgescence* (1). — Quoi qu'il en soit, il convenait de souligner l'importance de ce phénomène pour établir que la production des *éléments colloïdaux* ou *agglutinants* du sol primitif n'implique pas nécessairement une décomposition chimique préalable avec intervention d'acide carbonique. Nous reviendrons ultérieurement sur cet important sujet.

2° **Actions dissolvantes.** — Nous avons étudié comparativement, sur les roches et les minéraux porphyrisés, l'action de l'eau pure et de l'eau acidulée ou chargée de composés salins.

Eau pure. — Il résulte de nos premiers essais :

a) Que les poussières rocheuses, épuisées par l'eau pure, abandonnent généralement, au début, un résidu minéral appréciable (5 à 20 milligrammes) dont la composition chimique diffère sensiblement de celle de la roche initiale ;

b) Que les épuisements successifs fournissent un résidu soluble dont la proportion décroît très vite,

---

(1) C'est Daubrée, créateur de la *Géologie synthétique et expérimentale*, qui signala le premier la possibilité d'hydratation des poussières rocheuses. « Le limon produit par des matériaux feld-« spathiques, écrit-il, est en général impalpable et d'une ténuité « telle qu'il reste plusieurs jours en suspension dans l'eau. — Il « est très plastique : par la dessiccation, il se prend en masses si « solides, qu'on ne peut pas toujours les briser sans l'aide d'un « marteau. Ordinairement, il ressemble beaucoup aux argiles « schisteuses du terrain houiller, et quand il provient de la des-« truction du granite, il est parsemé de petites lamelles de mica, « comme ces dernières... D'un autre côté, le limon de trituration « paraît avoir fixé une certaine quantité d'eau, ce qui porterait à « conclure que celle-ci est entrée dans quelque combinaison nou-« velle comparable aux argiles. Ce qui domine cependant dans « cette boue plastique, ce sont les anciens éléments du granite, « car elle reste fusible au chalumeau... » *Géologie expérimentale*, pp. 251 et 252.

ce qui tendrait à prouver que les principes solubles provenaient, selon toute vraisemblance, d'une dégradation superficielle de la masse rocheuse ;

c) Que certains minéraux silicatés, riches en alcalis, porphyrisés au sein de l'eau (pulvérisation humide), cèdent surtout de la silice, de la potasse et de la soude (1), comme s'ils contenaient, à l'état d'inclusion, des silicates alcalins solubles ;

d) Que les éléments micacés et ferromagnésiens, après lavage à l'eau, sont à peu près insolubles et n'abandonnent aucune trace de fer décelable par les réactifs les plus sensibles.

A titre d'exemple, voici les résultats obtenus après huit jours, pour des roches porphyrisées, préalablement lavées, puis mises en digestion dans de l'eau distillée bouillie. Nous ne signalons ici que les essais relatifs à la dissolution de la potasse ; il a été employé 2 grammes de roche et 200 grammes d'eau.

	Potasse dissoute (en milligr.)
Gneiss passant au Leptynite (Vosges)	0,01
Leptynite inaltéré	0,02
Granite du Morvan (Château-Chinon)	0,23
Granite du Morvan déjà altéré	1,02
Granite erratique (Grenoble)	0,31
Porphyre syénite quartzifère (Côte-d'Or) . . .	0,31
La même roche déjà altérée.	0,62

La proportion d'alcali soluble à l'eau est excessivement

(1) DAUBRÉE supposait que les roches silicatées, pulvérisées au sein de l'eau, abandonnaient du *silicate de potasse ;* or, les analyses citées par l'auteur n'autorisent point cette supposition : la dose d'alcali étant vingt fois trop forte. — Dans nos expériences, la moyenne des rapports de la silice aux oxydes (pour la partie soluble à l'eau), serait de 8,5 à 9,5 (soit 40 pour 100 en chiffres ronds). La libération des silicates alcalins semble probable.

faible dans la plupart des cas, et il n'y a que les roches altérées ou pourries qui fournissent des nombres appréciables à l'analyse.

Les résultats sont bien différents quand on opère en présence de l'acide carbonique. (Voir *actions décomposantes.*)

D'où il suit que l'action dissolvante de l'eau pure ne se manifeste presque jamais directement — au moins d'une façon apparente — à l'égard des polysilicates naturels n'ayant subi aucune action décomposante ou épigénisante. Par contre, ainsi que nous l'avons montré, *l'action hydratante* n'est pas contestable à l'égard de certains éléments, et il semble bien que les espèces minérales, ainsi modifiées dans leur état physique ou dans leur constitution moléculaire, se montrent toujours plus accessibles aux agents chimiques et biologiques.

Eau acidulée. — Traitées par une solution chlorhydrique étendue (5 pour 100), les particules rocheuses, riches en éléments silicatés, sont attaquées assez rapidement. L'acide dissout de la chaux, de la magnésie et du fer en proportion souvent supérieure à celle des alcalis. Voici, du reste, les résultats obtenus en milligrammes :

ÉLÉMENTS DISSOUS PAR L'ACIDE CHLORHYDRIQUE A FROID (1).

DÉSIGNATION DES ROCHES		Alumine	Fer	Magnésie	Chaux
		mgr.	mgr.	mgr.	mgr.
Gneiss leptynisé	a)	1,30	3,31	0,72	2,24
	b)	2,07	4,73	3,16	6,60
Leptynite inaltéré	a)	0,00	2,50	0,72	2,69
	b)	0,03	1,57	2,22	3,13
Granite du Morvan	a)	1,30	5,50	0,72	2,46
	b)	0,00	7,20	5,04	4,59
Le même inaltéré	a)	9,00	19,00	2,30	4,48
	b)	7,70	22,10	4,96	4,25
Porphyre syénitique	a)	2,58	4,42	0,86	4,05
	b)	2,63	9,57	5,10	5,15
Porphyre quartzifère	a)	1,50	5,50	1,15	1,56
	b)	1,30	6,30	5,04	4,59

On remarquera que les roches de la série a), préalablement immergées dans l'eau pure, pendant huit jours, abandonnent généralement moins de matériaux que celles de la série b), provenant d'un traitement à l'eau chargée d'acide carbonique (voir décomposition chimique), et qui sont déjà en partie altérées.

Il semble donc que les bases terreuses offrent une moindre résistance aux agents dissolvants. Outre son action solubilisante, l'acide provoque des phénomènes d'épigénisation. Pour s'en convaincre, il suffit d'examiner les résidus minéraux au microscope polarisant avant et après la réaction. Les différences sont encore plus sensibles quand on laisse le réactif au contact de la roche pendant plusieurs semaines.

Eau saline. — Nous avons étudié plus spécialement,

(1) Cette expérience a été faite sur 2 grammes de roches porphyrisées immergées dans 100 cc. d'une solution chlorhydrique à 25 pour 100.

pour compléter nos recherches sur la mobilisation de la potasse, l'action des composés calciques en solution dans l'eau. Le chlorure de calcium (à 10 pour 100) réagit lentement, mais de façon très apparente, sur les mélanges de kaolin et de feldspath orthose. Sur ce dernier, on observe des pertes d'alcali bien supérieures à celles que l'on obtient avec l'eau chargée d'acide carbonique. Il se produit fréquemment des phénomènes d'épigénisation par la substitution partielle de la chaux à la potasse. Ne serait-ce pas là, d'ailleurs, le principal effet des solutions salines qui imprègnent les roches?...

D'après Daubrée, le feldspath trituré dans l'eau salée (3 pour 100 de sel) se décomposerait moins vite. Par contre, l'eau de chaux tendrait à faire sortir l'alcali.

3° **Actions oxydantes.** — L'*oxygène* s'est fixé sur les composés au minimum d'oxydation et en a modifié quelque peu la nature. On sait, en effet, que les schistes mélangés de pyrite blanche (sulfure de fer) se métamorphosent très vite au contact de l'air humide ; par suite de la combustion lente du soufre, il se fait des sulfates d'aluminium et de fer. Les éléments micacés et ferromagnésiens sont également modifiés et prennent une teinte jaunâtre à cause de la peroxydation des composés ferreux.

4° **Actions décomposantes.** — L'eau chargée d'*acide carbonique* agit efficacement sur les minéraux feldspathiques, auxquels elle enlève la majeure partie des bases alcalines et terreuses. Cette réaction conduit à la *kaolinisation*, c'est-à-dire à la formation de l'argile ou des roches argilacées. Il se produit, aux dépens du silicate double d'alumine et de potasse qui constitue le feldspath orthose, un *silicate d'alumine*

hydraté : l'argile, et du carbonate de potasse. Si le feldspath renferme de la chaux, il se forme à la fois, dans les mêmes conditions, de l'*argile* et du *calcaire*.

Nous avons étudié, M. Aurousseau et moi, l'action dissolvante comparée de l'eau pure et de l'eau chargée d'acide carbonique, sur différentes roches finement pulvérisées. Les essais ont porté sur 2 grammes de matière immergée dans 200 grammes d'eau; ils ont duré huit jours. La quantité de gaz carbonique, distribuée pour l'ensemble, était légèrement supérieure à un mètre cube. Voici (en milligr.) les proportions d'alcali dissoutes :

NATURE DES ROCHES	POTASSE DOSÉE		Différences.
	Eau CO^2	Eau pure.	
Gneiss leptynisé	7,72	0,31	7,41
Leptynite pure	7,90	0,32	7,58
Granite du Morvan	6,24	0,54	5,70
Granite altéré	7,64	1,32	6,32
Porphyre syénitique	6,24	0,62	5,62
Porphyre quartzifère	6,56	0,93	5,63

Les différences sont énormes, et l'on ne saurait vraiment mettre en doute l'action décomposante de l'acide carbonique. Ce corps, ainsi que nous allons le voir, a grandement contribué à la dégradation des masses rocheuses, ne fut-ce qu'en favorisant le départ des oxydes alcalins.

Berthier avait déjà signalé la transformation du feldspath en kaolin, mais c'est Ebelmen surtout qui a éclairci cette question (*Annales des Mines*, 1846-1848). Il a montré que le feldspath, sous l'action lente de l'eau chargée d'acide carbonique, se transforme en kaolin et abandonne la presque totalité de

sa potasse, qui est entraînée à l'état de carbonate. L'élément feldspathique cède aussi une partie de la silice à l'état gélatineux (1). Avec le *basalte*, on obtient des résultats semblables :

	COMPOSITION CENTÉSIMALE	
	Basalte normal.	Basalte altéré.
Silice	46,1	36,7
Alumine	13,2	30,5
Chaux	7,3	8,9
Magnésie	7,0	0,6
Oxyde ferrique . . .	16,6	4,3
Alcali	4,5	1,5
Eau	4,9	16,9

A richesse égale en alumine, la comparaison des nombres accuse une chute de 30 pour 100 pour la silice, de 5 pour 100 pour la chaux, de 6,7 pour 100 pour la magnésie, de 14,7 pour 100 pour le fer, et de 3 pour 100 pour les alcalis. On trouve, par rapport aux corps eux-mêmes, que la proportion de silice diminue de 66 pour 100, et celle de la potasse de 87 pour 100.

Les analyses suivantes du feldspath et du kaolin, faites par Berthier, montrent parfaitement la migration de la silice et des alcalis :

	COMPOSITION CENTÉSIMALE	
	Feldspath.	Kaolin.
Silice	64,2	46,8
Alumine.	18,4	37,3
Potasse	17,0	2,5
Eau	0,0	13,0

(1) On peut montrer la formation de la silice gélatineuse (SiO^2, H^2O) en faisant passer un courant d'acide carbonique (CO^2)

En rapportant les nombres à 18,4 d'alumine, on trouverait pour le kaolin 23,1 de silice — soit une perte de 41 pour 100 — et 1,4 de potasse : soit une perte de 15,9 pour 100 par rapport au feldspath.

Dans les sols granitiques, où les éléments grossiers sont encore en voie de décomposition, nous avons observé également un bel exemple de migration des alcalis. En analysant les éléments mécaniques : sable grossier, sable fin et argile, d'une terre de la Creuse, nous trouvons en effet :

	POUR CENT PARTIES	
	Chaux.	Potasse.
Sable grossier	0,806	1,33
Sable fin	0,357	0,58
Argile	0,208	0,51

Ainsi, c'est le sable grossier — c'est-à-dire le corps se rapprochant davantage de la roche primitive — qui contient le plus de chaux et de potasse. Dans les éléments fins, accusant une décomposition plus avancée, ces principes vont en décroissant d'une manière sensible et progressive.

Toutes les roches ne se désagrègent pas avec la même facilité. C'est ce qui ressort manifestement des expériences de M. Muller. Différents minéraux pulvérisés et séchés ont été soumis à l'action de l'eau chargée d'acide carbonique, à la pression de trois atmosphères et demie ; après un temps déterminé, compris entre 49 et 52 jours, on a fait l'analyse de la partie soluble. En comparant les résultats obtenus, pour les matériaux dissous, avec ceux des substances primitives brutes, on trouve :

---

dans une solution de silicate de potasse (SiO^3K^2). La réaction serait la suivante :

$$SiO^3K^2 + H^2O + CO^2 = CO^3K^2 + SiO^2, H^2O.$$

OMPOSITION CENTÉSIMALE

DES MINÉRAUX TRAITÉS

T DES MATIÈRES DISSOUTES POUR 100 PARTIES DES DIFFÉRENTS CONSTITUANTS

(Expériences de M. MULLER)

ÉLÉMENTS DOSÉS	ADULAIRE		OLIGOCLASE		HORNBLENDE		OLIVINE		APATITE	
	RUT	DISSOUS	BRUT	DISSOUS	BRUT	DISSOUS	BRUT	DISSOUS	BRUT	DISSOUS
Silice	65,24	0,1552	61,55	0,237	49,12	0,419	40,60	0,873	»	»
Acide phosphorique . . .	»	»	»	»	»	»	»	»	41,54	1,822
Alumine	18,15	0,1368	23,80	0,1713	9,004	traces	0,86	traces	»	»
Oxyde de fer	traces	traces	traces	traces	24,925	4,829	12,35	8,733	»	»
Chaux	1,28	traces	3,18	3,213	8,761	8,528	traces	traces	54,68	2,168
Magnésie	»	»	0,80	»	5,92	traces	45,81	1,291	»	»
Potasse	14,95	1,3727	0,38	traces	»	»	»	»	»	»
Soude	»	»	9,67	2,307	2,13	»	»	»	»	»
Totaux	99,73		99,38		99,62		99,62		96,12	

L'acide carbonique, dans tous les cas, libère une certaine quantité de silice et d'alumine, mais son action se porte principalement sur les oxydes alcalins et terreux qui sont transformés en carbonates. Il convient de remarquer, en outre, que le feldspath adulaire se montre plus résistant que l'oligoclase ; la hornblende se décompose mieux que les feldspaths, mais c'est l'olivine et l'apatite qui cèdent le plus rapidement.

En somme, ces expériences nous apprennent que la dégradation des roches, sous la seule intervention de l'eau et de l'acide carbonique, s'effectue très lentement et avec une intensité fort variable. Nous serions même tenté de croire que la production des agents colloïdaux ou agglutinants est imputable à d'autres causes (pulvérisation humide et actions hydratantes); mais les essais que nous avons effectués sur les minéraux silicatés (avant et après traitement aux acides étendus) nous laissent concevoir un autre processus de décomposition caractérisé précisément par une intensité plus grande.

Contrairement à ce que nous supposions tout d'abord, les poussières rocheuses immergées dans les solutions acidulées ou salines sont attaquées plus aisément par l'eau chargée d'acide carbonique : elles abandonnent parfois un résidu minéral deux à trois fois plus fort, et il semble que la kaolinisation des feldspaths et des micas soit surtout imputable à une double action. En premier lieu, sous l'influence des eaux acidulées et salines, il y a dissolution puis épigénisation. Les substitutions chimiques (actions épigénisantes) modifient la structure moléculaire et facilitent à un haut degré la décomposition ultérieure de certains minéraux par voie de carbonatation. — Ainsi, un feldspath orthose dosant 10,8 pour 100 de potasse abandonne 0,9 d'alcali (après

deux jours) à l'eau chargée d'acide carbonique ; il en cède 2,3 dans les mêmes conditions, quand on l'a immergé pendant une semaine dans du chlorure de calcium à 10 pour 100.

Il convient de reconnaître que l'influence des solutions salines ou acidulées n'entre pas suffisamment en ligne de compte dans l'étude de la formation des sols. Et c'est parce que l'on attribue d'ordinaire une trop grande importance à l'action décomposante de l'eau chargée d'acide carbonique — au point de vue géologique — qu'il nous a paru intéressant de relater brièvement l'ensemble de nos observations.

Travail de dégradation biologique. — Les actions mécaniques et physico-chimiques ne sont pas les seules causes de la décomposition des roches ; les micro-organismes, les plantes mêmes ont contribué dans une certaine mesure à ce grand travail. M. Müntz, en 1890, a signalé l'influence des êtres inférieurs, des ferments, dont il constata la présence aux fortes altitudes dans les « roches pourries ».

Plus récemment, M. Fausto Sestini a donné la preuve manifeste de l'intervention des racines. Il remplit deux pots semblables avec un kilogramme de sable feldspathique lavé, séché et dépourvu d'argile ; il sema, dans l'un, un mélange de graminées ; l'autre resta sans culture, mais reçut les mêmes arrosages. Quand l'expérience fut terminée, il dosa la proportion de terre fine et l'argile qu'elle contenait ; il obtint les résultats suivants :

	Sable témoin.	Sable cultivé.
Terre fine.	14,99	33,50
Argile pour 100 de terre fine.	1,05	4,02

Ainsi, la végétation favorise la désagrégation hydrolytique des feldspaths : les racines s'emparent des bases, comme elles dissolvent le carbonate de chaux des calcaires ; mais en dehors de l'influence des sucs acides sécrétés par les poils absorbants, il faut tenir compte aussi de l'acide carbonique produit par la respiration des organes souterrains et par la combustion lente de tous les débris d'êtres organisés qui doit aboutir à la formation de l'élément organique du sol : l'*humus.*

Que la plante ait agi de son vivant, grâce à son pouvoir d'assimilation, cela paraît incontestable. Mais il y a plus ! La matière végétale morte contribue aussi à la dégradation des espèces minérales : elle y contribue directement, par les produits résultant de l'*humification* (production de l'humus), et indirectement, par l'infinité des microbes auxquels elle sert habituellement ou de support ou d'aliment.

Rien n'est plus facile que de mettre en évidence le rôle prépondérant des composés humiques dans la désagrégation des roches. Il suffit pour cela de mélanger à des sables granitiques (sable grossier et sable fin séparés par lévigation) une proportion variable de tourbe ou d'acide humique (20 à 50 pour 100). En opérant en milieu stérilisé ou non stérilisé, on peut se rendre compte de l'influence des actions microbiennes. Dans tous les cas, il importe d'humidifier convenablement la masse par des arrosages à l'eau distillée. A la fin de l'expérience on fait l'analyse physique de la terre incinérée. Il résulte des essais que nous avons exécutés, après une durée de six mois :

1° Que la présence de l'humus favorise toujours la formation de la matière argileuse, dans les mélanges sableux, proportionnellement à l'abondance du sable fin silicaté ;

2° Que la proportion d'argile croît avec la dose d'humus, surtout dans les milieux non stérilisés (5,8 pour 100 d'argile en moyenne).

Pour ne rien omettre d'essentiel, il convient de signaler encore le rôle de certains animaux inférieurs, et notamment des *vers de terre* ou *lombrics*, qui participent simultanément à la production de l'humus et à l'attaque des particules sableuses. Ces invertébrés vivent surtout de détritus végétaux et terreux qui subissent dans le tube digestif, sous l'influence du frottement, une véritable mouture. Le célèbre naturaliste anglais Darwin attribue à cette seule action l'origine des éléments les plus fins du sol ; il a constaté que, dans une pâture crayeuse, la totalité de ces éléments — jusqu'à une profondeur de $0^{m},25$ — pouvait être intégralement ingérée puis excrétée par les vers en une cinquantaine d'années. C'est surtout dans les régions tropicales que de telles actions se manifestent utilement. En Guinée, par exemple, au dire de M. Millson, d'immenses plaines couvertes de cultures variées doivent leur fertilité aux *façons* continuelles qu'y donnent les vers de terre. « Si l'on creuse le sol, « on voit qu'il est parcouru en tous sens par d'innom- « brables galeries de lombrics. C'est là un labourage « constant et gratuit, et les populations l'apprécient « si bien qu'elles ne cultivent pas les endroits où les « vers font défaut. »

Et voilà comment toutes ces actions biologiques diverses — jointes à celles d'ordre purement chimique — ont pris une part importante à la décomposition des matériaux constitutifs des roches ignées et sédimentaires : nous voulons dire à la formation de la terre végétale.

III. — Phénomènes de sédimentation.

Je suppose l'œuvre de la désagrégation accomplie. Des débris rocheux divers — pierres, graviers et

sables — se trouvent associés à des quantités variables d'argile, de calcaire et d'humus : nous sommes en présence du *sol végétal*. Quelles modifications ce sol a-t-il subies ? Aurait-il pour assises la roche même qui lui a donné naissance, ou bien les éléments qui le composent ont-ils une autre origine ? A la vérité, les deux cas se présentent. Et si parfois les produits de la désagrégation restèrent sur place, pour former des *sols authigènes* — caractérisés par leur faible profondeur, par leur constitution minéralogique peu différente de celle des couches sous-jacentes et par le caractère anguleux des fragments rocheux — ils furent bien souvent charriés à d'assez grandes distances. Les *phénomènes de sédimentation* contribuèrent ainsi à la formation des *sols allothigènes* qui reposent généralement sur un sous-sol de constitution toute différente, et dont les particules, roulées par les eaux, ont les arêtes émoussées ou arrondies.

Les *actions sédimentaires*, à l'origine, se manifestèrent de façon très intense pour engendrer les *dépôts diluviens* qui recouvent de vastes étendues. M. A. de Lapparent résume en ces termes le rôle prépondérant de la *sédimentation marine* :

« Partout nous voyons les *agents d'érosion* à l'œuvre, « pour débiter la surface terrestre, et en emporter les dé- « bris, soit dans les lacs intérieurs des continents, soit « dans le grand réservoir de la mer. Ces matériaux, pour « n'envisager que les principaux, sont de trois sortes : il « y a les produits de la trituration des minéraux durs, « presque exclusivement sableux, et ne descendant pas, « en général, au-dessous d'un certain degré de division, « qui en fait des *sables* plus ou moins fins, tandis que, « plus près du rivage, dans la zone agitée par les vagues, « se déposent des graviers, parfois même de gros cailloux, « ou *galets*. Ensuite viennent les matières fines en sus- « pension, toujours de nature argileuse, qui ne se déposent

« que dans les eaux tranquilles et engendrent des *vases*.
« Enfin, il faut tenir compte des matières empruntées par
« dissolution à la terre ferme, et dont la plus importante
« est le *calcaire* ou *carbonate de chaux*. La quantité de
« cette substance contenue dans la mer irait toujours en
« augmentant, si précisément cet excès ne provoquait le
« développement d'êtres inférieurs, *polypiers*, *protozoaires*,
« *algues* spéciales, qui fixent le carbonate dans leurs tis-
« sus, et engendrent par l'accumulation de leurs dépouilles
« des masses calcaires, dont la forme la plus connue est
« celle des récifs de polypiers (1). »

Les effets de la *sédimentation terrestre* ne sont pas moins saisissables. Quand une pluie torrentielle tombe sur une surface de terre inclinée, le ruissellement de l'eau entraîne dans la vallée les particules fines et parfois la couche arable tout entière.

« La terre végétale abandonne ainsi peu à peu le pen-
« chant des montagnes et des collines, et la dénudation
« qui devient de plus en plus rapide ne tarde pas à être
« complète et irrémédiable, si on ne s'y oppose, soit en
« gazonnant les pentes ou en les reboisant, parce que le
« lacis des racines empêche l'entraînement des particules
« terreuses, soit en disposant de distance en distance des
« petits murs qui retiennent le sol en échelons horizon-
« taux (2). »

Il arrive souvent que les éléments très fins sont transportés à de grandes distances par les cours d'eau. Sait-on la proportion de matières terreuses qui peut être ainsi charriée ? D'après Hervé-Mangon, la quantité de limon transportée annuellement par la *Durance*, à Mérindol, serait supérieure à 11 millions de

(1) A. de Lapparent : *Leçons de géographie physique*, pp. 290 et 291.

(2) P. Sabatier : *Leçons de Chimie agricole*, p. 54.

mètres cubes, contenant 14.000 tonnes d'azote. Ce seul exemple montre l'intérêt qu'il y aurait à récupérer par le *colmatage* les alluvions que les fleuves et les rivières charrient pendant les crues, et qui vont se perdre inutilement à l'embouchure des fleuves ou dans le lointain des mers.

A la *sédimentation aqueuse* vint se joindre la *sédimentation éolienne,* c'est-à-dire le transport des particules terreuses ou des poussières par le vent. La formation des dunes, sur les côtes de Gascogne, donne une idée de l'influence qu'exercent les courants aériens sur le déplacement des poussières dépourvues de toute cohésion. On explique ainsi l'origine des landes des Etats-Unis et de certaines régions africaines... RICHTOVEN suppose même que les immenses dépôts de « *lœss* » constituant le sol d'une partie de la Chine sont surtout formés par de la poussière provenant des grands déserts de l'Asie centrale.

On comprend très bien que de telles actions réunies aient pu, au cours des siècles, provoquer de profonds remaniements et donner ainsi naissance à une surface considérable de terrains transportés (1).

---

(1) Notre éminent collègue et maître, M. Stanislas MEUNIER, dont les remarquables travaux de géologie expérimentale sont universellement connus et appréciés, a reproduit de nombreux cas d'érosion et de sédimentation pluviaire, fluviaire, lacustre, glaciaire, éolienne et souterraine, qui intéressent grandement la formation des terrains (*Cours de Géologie expérimentale*, chez Félix ALCAN, éditeur, Paris).

II

LA CONSTITUTION DU SOL

La parfaite connaissance du sol ne repose pas exclusivement sur les données géologiques. Et s'il est juste de dire que l'étude de la formation des terres arables peut fournir d'utiles indications sur leur origine et leur nature, il ne s'ensuit pas qu'elle puisse toujours nous renseigner de façon très précise sur la valeur agricole des terrains cultivés.

Alors même que les roches originelles offriraient une composition semblable, il n'en faudrait pas moins chercher d'autres moyens d'appréciation, en raison de ce fait incontestable que les produits de la désagrégation des masses rocheuses ont été souvent transportés fort loin et qu'ils ont subi, au cours de leur voyage, de fréquents et profonds remaniements.

D'autre part, pour les terrains formés sur place, il faut aussi tenir compte des modifications qu'ils ont éprouvées, à la longue, sous l'influence combinée des fumures, des cultures et des actions chimiques et biologiques.

Entre la couche arable et les roches sous-jacentes qu'elle recouvre, les différences sont parfois des plus accentuées au point de vue chimique. D'où résulte l'impérieuse nécessité d'étudier la constitution des sols en place. Pour suivre un ordre rationnel et logique, il convient d'examiner successivement : la *composition physique*, la *composition minéralogique* et la

composition chimique des terrains, en ayant soin d'indiquer, dans chaque cas particulier, les méthodes analytiques ou les procédés de séparation dont il est fait usage dans les laboratoires.

I. — Constitution physique.

La partie superficielle de la terre végétale — celle dans laquelle pénètrent les instruments aratoires — présente ordinairement une *structure granuleuse*. Les composants mécaniques ou physiques qui en forment le squelette n'y sont pas à vrai dire isolés les uns des autres : ils constituent, au contraire, des *agglomérats terreux* de dimensions très inégales, qui ont pour principal effet, en rendant le milieu poreux et perméable, de faciliter au plus haut degré la pénétration des agents atmosphériques. Il suffirait, en somme, d'étudier ces agrégats pour se faire une idée suffisamment exacte de ce qu'est le sol au point de vue physique. Comment les particules terreuses ont-elles pris naissance ? Quels sont les matériaux qui les composent et par quels moyens arrive-t-on à les séparer ? Voilà les questions qu'il faut d'abord étudier.

Les agrégats terreux. — Dans une terre normale, où tous les éléments physiques sont représentés, chaque agrégat renferme un noyau sableux enveloppé et parfois imprégné d'éléments colloïdaux d'une finesse extrême qui jouent le rôle d'agents de cimentation. Ainsi, l'examen des conglomérats nous conduirait à distinguer des *matériaux de remplissage* et des *matériaux d'agglutination*. Les premiers, dépourvus de cohésion, forment à vrai dire le squelette : ils comprennent surtout des *sables* (siliceux, silicatés et calcaires) et des *débris végétaux* incomplètement

humifiés; les seconds, dont le rôle est comparable à celui du ciment, sont représentés par l'*argile* et la *matière noire*, c'est-à-dire par des substances essentiellement colloïdales, susceptibles d'enrober tous les débris sableux primitifs.

Physiquement, chaque agrégat est semblable à une sorte de béton dont les sables forment le corps, et dont les éléments colloïdaux représentent le ciment. Mais l'agglomération n'est possible que si la prise des ciments se trouve assurée. Il faut, pour cela, que l'argile soit coagulée : ce sont les *composés calciques* — le bicarbonate de chaux notamment — qui déterminent cette coagulation. Grâce à l'acide carbonique produit dans la décomposition des matières organiques, il se dissout, dans les eaux terrestres, une quantité suffisante de calcaire (carbonate de chaux) pour assurer la précipitation de l'argile. Et voilà comment tous les composants essentiels interviennent, à des titres divers, dans la formation de ces particules terreuses qui modifient de façon si heureuse les propriétés physiques du sol.

Toutefois, dans les terrains où les éléments d'agglutination sont trop disproportionnés — comme dans ceux où les agents de coagulation font défaut — les caractères physiques deviennent à tel point exagérés qu'il faut recourir à des moyens artificiels pour modifier la texture du sol. Il importe donc de bien connaître la composition mécanique des agglomérats terreux. C'est l'*analyse physique* seule qui peut nous donner, à cet égard, des indications suffisamment précises.

La séparation des composants. — Voici un échantillon de terre supposé homogène et préalablement desséché à 100-110 degrés; il faut y doser le sable, le calcaire, l'argile et l'humus : comment allons-nous

effectuer ces séparations ? Un examen superficiel montre que cet échantillon contient des matériaux de différentes grosseurs. On les isolera par tamisage ou par lavage, en opérant sur un poids connu de terre sèche (la prise d'échantillon étant d'autant plus forte que les graviers et les cailloux sont plus abondants). Nous procédons ainsi à la séparation de la *terre fine* à l'aide d'un tamis ayant un millimètre de maille ; si les graviers restant dans le crible présentent un aspect terreux, on les lave à l'eau distillée, puis on les sèche et on les pèse. Après évaporation des eaux de lavage, le résidu sec obtenu est incorporé à la terre fine dont on détermine le poids.

Pour séparer le sable grossier, le sable fin et l'argile, on fait usage des méthodes de lévigation. Toutefois, en admettant que les sables grossiers ont un diamètre supérieur à deux dixièmes de millimètre ($0^{m},0002$), il serait encore possible de les isoler par tamisage et lavage sur un tamis de soie. C'est le dosage des éléments fins qui présente le plus de difficultés ; il comporte la décoagulation de l'argile (c'est-à-dire l'élimination préalable des composés calciques par traitement aux acides et lavages prolongés à l'eau), puis sa séparation d'avec les éléments sableux. A cet effet, on peut employer la *méthode hydraulique*, qui utilise des courants d'eau dont les vitesses sont calculées de manière à ne transporter que les particules d'une dimension déterminée (1), ou bien la *méthode de sédimentation*, qui repose sur l'inégale rapidité de chute des particules mises en suspension dans

---

(1) Cette méthode, préconisée par M. Hilgard, peut offrir quelques avantages pour la séparation de l'argile ; elle a été utilisée en France par M. Garola. Comme elle nécessite des appareils spéciaux, et que les résultats qu'on en obtient sont loin d'être parfaits, nous nous contentons de la mentionner.

une eau tranquille. Au reste, voici la marche généralement suivie pour la séparation des éléments physiques.

Dosage du sable et de l'argile. — On dose le sable et l'argile sur 5 ou 10 grammes de terre fine sèche. Tout d'abord, il faut désagréger convenablement les particules terreuses. Pour cela, M. Hilgard propose de les disloquer par une ébullition prolongée dans l'eau distillée. En recommençant plusieurs fois cette opération et décantant les liquides, après un instant de repos, on arrive rapidement à la séparation du *sable grossier* et du *limon*. Cette séparation est complète lorsque les eaux de décantation présentent une parfaite limpidité.

Le sable grossier, mêlé parfois de débris organiques, reste dans la capsule ou dans le ballon ; il est recueilli, séché et pesé. En le traitant par un acide, on dissout la partie calcaire, et il suffit de laver le résidu, de le sécher et de le peser à nouveau pour connaître la proportion de sable grossier calcaire et de sable grossier siliceux ou silicaté. L'incinération permettrait, au besoin, d'apprécier approximativement la quantité de matières végétales non humifiées.

Restent les eaux boueuses ou limoneuses qui contiennent le calcaire terreux, le sable fin, l'argile et l'humus. Pour en séparer l'argile, il faut la décoaguler, ainsi que l'a montré M. Th. Schlœsing. A cet effet, on traite par de l'acide azotique en léger excès : le calcaire est alors décomposé, et le liquide se clarifie. On décante par siphonage, puis le résidu terreux, recueilli sur un filtre, est soigneusement lavé à l'eau distillée jusqu'à ce que les eaux d'égouttage ne présentent ni réaction acide, ni traces de chaux (1). A ce moment, la décoagulation étant faite, on peut aisément éliminer l'argile d'avec le sable fin.

---

(2) On détermine qualitativement la réaction acide à l'aide du papier de tournesol bleu ; pour déceler la présence des sels de chaux on emploie l'oxalate d'ammoniaque, qui donne un précipité blanc d'oxalate de calcium, insoluble dans l'acide acétique.

La partie terreuse détachée du filtre est ensuite introduite dans un grand flacon et mélangée avec un litre d'eau additionnée de 10 cc. d'ammoniaque. Après agitation, on laisse reposer vingt-quatre heures : le sable fin se précipite, tandis que l'argile et l'humus (celui-ci à l'état d'humate d'ammoniaque) restent dans le liquide. On décante, à l'aide d'un siphon, et l'on recueille les eaux. Si la terre est très argileuse, il faut recommencer le traitement jusqu'à ce que l'argile soit complètement entraînée. Cela fait, on débouche le flacon pour en extraire le *sable fin* qui sera séché et pesé (1).

Le liquide trouble — coloré par un humate multiple d'ammoniaque, de fer et d'aluminium — est alors traité par un excès de chlorure alcalin (chlorhydrate d'ammoniaque) qui coagule l'argile sans réagir sur l'humate. Quand la solution a été clarifiée, après un repos suffisant, on en décante le plus possible ; l'argile est recueillie sur un filtre taré, lavée, séchée et pesée. La dose de chlorhydrate d'ammoniaque à employer varie selon la quantité d'humate en dissolution ; il en faut jusqu'à 20 grammes lorsque celui-ci est très abondant.

Dosage du calcaire et de l'humus. — Il serait possible, à la rigueur, de séparer ces corps au cours de l'analyse physique, ainsi que le conseillent certains auteurs. Nous avons déjà indiqué comment on détermine approximativement la proportion de calcaire grossier. Pour le calcaire terreux, on se contente parfois de doser la chaux, par l'oxalate d'ammoniaque, dans le liquide provenant de l'attaque des éléments, faite en vue de la décoagulation de l'argile. Mais la chaux ainsi obtenue n'appartient pas exclusivement au carbonate : elle peut provenir aussi du sulfate et de l'humate calciques.

L'analyse du calcaire doit être effectuée de préférence

---

(1) Pour effectuer rigoureusement les dosages des éléments sableux et argileux, la calcination est rendue nécessaire par l'entraînement d'une certaine quantité d'humus. Ainsi, avec les terres humifères, la matière organique entraînée n'est pas négligeable ; elle peut atteindre plus de 10 pour 100.

sur la terre même ; elle comporte, en somme, un dosage d'acide carbonique qu'on peut faire au calcimètre (si l'on se contente d'une approximation) ou à la trompe (si l'on veut obtenir un résultat plus précis).

On pourrait aussi doser l'humus en le précipitant de la solution ammoniacale — obtenue après la séparation de l'argile — par l'emploi d'un acide. Mais les nombres trouvés sont toujours trop faibles et il vaut infiniment mieux déterminer ce corps par la méthode d'incinération que nous décrirons ultérieurement.

Les procédés suivis pour l'analyse physique donnent avec assez d'exactitude la proportion de *sable grossier* et de *calcaire*, mais la séparation du *sable fin* et de l'*argile* est quelque peu arbitraire : les nombres obtenus varient avec le temps de repos. Non seulement la précipitation des éléments reste incomplète, mais une partie notable de la matière organique se trouve entraînée inévitablement par les dépôts. Dans ses récentes études sur la terre arable (1), M. Th. Schlœsing lui-même n'a-t-il pas signalé ces imperfections ? Après avoir montré qu'on pouvait, à l'aide d'un dispositif automatique, recueillir les sables fins par ordre de grandeur décroissante — en ayant recours à la fois au temps que ces sables emploient à parcourir au sein de l'eau une hauteur donnée, et aux poids des dépôts formés pendant les intervalles successifs de ces temps — M. Schlœsing eut l'excellente idée de déterminer la fraction de matière organique entraînée par les dépôts sableux et l'argile. En opérant sur des sous-sols, afin d'éviter l'influence des fumures, il a trouvé :

---

(1) Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. CXXXVII, p. 369, et t. CXXXV, p. 601.

	POUR 100 DE MATIÈRES PRÉCIPITÉES			
	Terre de Boulogne (nature calcaire)		Terre de Neuphle (agilo-siliceuse)	
	Carbone.	Humus. (1)	Carbone.	Humus.
Sable grossier (déposé en 10 secondes).	0,20	0,40	0,073	0,146
Sable fin (déposé en 5 minutes) . .	0,33	0,66	0,089	0,178
Sable très fin (déposé en 1 heure). .	1,20	2,40	0,350	0,700
Sable surfin (déposé en 25 heures). .	3,92	7,84	3,560	7,120
Argile (restant en suspension) (2). .	2,73	5,66	2,070	4,140

On voit, par cet exemple, combien la séparation rigoureuse des éléments mécaniques est chose délicate et difficile, surtout en ce qui concerne les substances fines et colloïdales, l'argile et l'humus proprement dits. A quelles causes faut-il attribuer ces imperfections et comment peut-on les corriger ? Sans vouloir faire une critique approfondie des méthodes analytiques couramment employées, je me permettrai de soulever deux objections principales qui visent l'insuffisance du décapage des particules et l'imperfection des moyens de séparation.

a) Les lavages à l'eau, même quand ils sont prolongés, n'enlèvent jamais complètement l'*enduit humo-argileux* qui revêt les grains de sable ; si l'on veut détruire ce revêtement, il faut décaper les particules par un traitement préalable à l'*acide oxalique.* Ce corps a l'avantage de décomposer le calcaire et les autres sels calciques qui passent à l'état d'oxalate de chaux ; il attaque les composés ferreux et ferriques associés à l'argile et à l'humus. Si la terre

(1) L'humus est calculé en doublant le carbone organique.

(2) L'argile fut coagulée par du chlorure de potassium, à la dose de 5 grammes par litre.

convenablement traitée est ensuite soumise à l'action d'un acide minéral étendu (acide chlorhydrique ou acide azotique) qui dissout l'oxalate de chaux, puis mise en digestion pendant plusieurs jours dans de l'eau ammoniacale, le résidu lavé à l'eau peut servir à la séparation des éléments sableux et argileux. En suivant nos prescriptions, on obtient des sables d'une grande pureté (1).

b) Au lieu de séparer les composants siliceux et silicatés par les procédés ordinaires, nous éliminons d'abord le sable grossier à l'aide du tamis n° 100, puis le sable fin et le limon avec le tamis n° 240 ; enfin, pour la séparation de l'argile, nous utilisons les différences de densité. La matière est immergée dans une solution (formée d'un mélange d'iodure de méthylène et de xylène) dont le poids spécifique est légèrement supérieur à celui de l'argile. Sous l'influence de la force centrifuge — nous nous servons d'un centrifugeur hydraulique — la séparation se fait très rapidement : les éléments sableux tombent au fond, tandis que l'argile se porte à la surface. Il suffit de recueillir séparément ces matériaux, de les laver, de les sécher et de les peser.

Les données pratiques. — C'est en se basant sur les résultats obtenus par l'analyse physique que les agronomes modernes ont établi la nomenclature et la classification des terres.

C'est également de la constitution mécanique du

---

(1) L'acide oxalique ayant la propriété de décomposer le carbonate de chaux avec dégagement d'acide carbonique, on peut mesurer ce gaz et déterminer ainsi la proportion de calcaire ; la chaux totale (sauf celle des silicates) se dose dans la solution acide ; enfin, pour avoir la proportion de *matière noire* ou d'humus actif, il suffit de précipiter la liqueur ammoniacale et de recueillir l'acide humique.

sol que dépendent ses qualités physiques propres. Celles-ci, comme nous le montrerons plus tard, influent considérablement sur la valeur culturale d'une terre donnée. Dans un *sol simple*, exclusivement formé de sable, de calcaire, d'argile ou d'humus, les caractères physiques sont tellement exagérés que la culture devient parfois impraticable. Au contraire, lorsque les divers éléments mécaniques ou physiques se trouvent associés en proportions convenables *(sols composés)*, la nature du milieu change totalement, et les végétaux s'y développent avec vigueur.

Classification agrologique. — Pour apprécier les *qualités physiques* du sol, on prend pour base de comparaison la *terre franche*, qui possède, au plus haut degré, en raison de sa constitution, toutes les propriétés requises. Elle contient, en effet, *pour 100 parties :*

Sables divers.	60 à 70
Calcaire fin	10 à 20
Argile brute	10 à 15
Humus.	5 à 10

Bien que ces données n'aient rien d'absolu, puisque des sols plus riches en calcaire, en argile et en humus ne sont pas moins aptes à la production, elles offrent cependant un moyen d'appréciation assez utile pour la classification agrologique. Si les conditions de productivité dépassent les limites de la terre dite franche, si un autre mode d'association des éléments antagonistes, contrebalançant leurs effets, peut assurer la formation des particules terreuses et, de ce chef, l'ameublissement du sol, cela n'infirme en rien la valeur des données convention-

nelles, car un terrain ainsi constitué ne sera jamais inférieur aux autres par ses qualités physiques.

Mais des considérations non moins importantes montrent l'utilité de la méthode comparative.

C'est elle qui a permis de grouper les terrains d'après leurs caractères extérieurs et d'établir ensuite une nomenclature rationnelle. Et s'il est d'usage encore, dans la pratique agricole, de distinguer des *terres fortes* et des *terres légères*, les cultivateurs savent très bien que la « *force* » et la « *légèreté* » des terrains (c'est-à-dire leur consistance plus ou moins grande) dépendent de l'état de division des particules et surtout de l'abondance de l'argile ou du *limon impalpable.*

Il semble ainsi, de prime abord, que la classification agrologique repose à la fois sur les qualités et la composition physique des terrains. Bien que ces caractères ne soient pas toujours incompatibles, il serait téméraire de les envisager simultanément d'une façon trop absolue. Du fait que les terres argileuses sont toujours des terres fortes, on n'est pas autorisé à dire que toutes les terres fortes sont argileuses. A mon avis, dans une classification agrologique rationnelle, il faut faire abstraction des *fonctions de relation* inhérentes au mélange terreux. C'est la prédominance des composants qui doit seule entrer en ligne de compte. Et voilà pourquoi la comparaison des données analytiques offre une réelle utilité. En ne considérant que les *composants essentiels,* les sols arables peuvent se ramener à quatre types fondamentaux :

1° Les sols simples ou homogènes ;
2° Les sols composés binaires ;
3° Les sols composés ternaires ;
4° Les sols normaux ou complets.

Dans tous les cas, les éléments dominants (qui permettent de qualifier ou de nommer le terrain) forment les neuf dixièmes de l'ensemble. Le sol est supposé simple si l'un des composants y figure au moins pour 75 ou 80 pour 100, et à condition que la proportion de l'un des autres n'atteigne jamais 20 pour 100. Pour les sols composés, la dose limite de l'élément dominant sera comprise entre 50 et 60 pour 100 (sols binaires), 40 et 50 pour 100 (sols ternaires), 20 à 30 pour 100 (sols normaux).

Le schéma ci-dessous (fig. 2) résume la classification agrologique déduite de l'analyse physique.

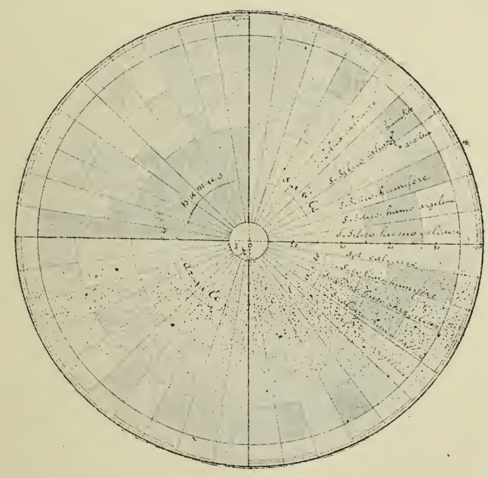


Fig. 2. — Schéma synthétisant la classification et la nomenclature agrologiques. Le trait simple extérieur correspond aux *sols homogènes*, le double trait aux *sols binaires*, et le triple trait aux *sols ternaires*.

Cette figure donne également la clé de la nomenclature des terrains dont nous allons rappeler brièvement les principes fondamentaux.

Nomenclature agrologique. — En ce qui concerne la dénomination des terrains agricoles, deux cas sont à considérer suivant que le sol est *simple*, c'est-à-dire formé presque exclusivement par un seul élément mécanique, ou *composé*, c'est-à-dire formé par l'association de plusieurs éléments. Les règles de la nomenclature peuvent s'énoncer ainsi :

1° Quand un élément mécanique domine dans un sol, de manière à masquer tous les autres, on dit le sol argileux, sableux, calcaire ou humifère selon la nature de l'élément dominant.

2° Quand plusieurs éléments se trouvent mélangés dans des proportions suffisantes pour imprimer leur cachet particulier, on est en présence d'un sol composé qui sera argilo-siliceux ou sablo-argileux, selon que l'argile ou le sable abondera, argilo-calcaire ou calcaro-argileux suivant qu'il dosera plus d'argile ou de calcaire, etc.

Dans l'un et l'autre cas, si le sable ou le calcaire revêtent un état moléculaire particulier, on devra l'indiquer en faisant suivre la désignation du sol du mot *pierreux, caillouteux, graveleux,* etc. On dira, par exemple, *sol calcaire pierreux, sol sablo-argileux graveleux,* etc.

On ne saurait trop recommander aux cultivateurs qui emploient encore des expressions locales, pour nommer les terrains, de se familiariser avec ces désignations intelligibles et faciles qui sont usitées par tous les agronomes. Une seule difficulté se présente parfois pour les terres binaires et ternaires où la prédominance des éléments n'est pas très accentuée.

Voici un sol composé d'argile et de sable : comment le nommerons-nous ? Est-il argilo-sableux ou sablo-argileux ? Quelles raisons, en dehors des données analytiques, pourraient-elles dicter plus sûrement notre choix ? Aucune. Il suffit par conséquent

de se reporter aux données analytiques et de se souvenir que le nom du sol composé dérive de celui des éléments (dont la proportion dépasse 20 pour 100) qui sont *toujours énoncés par ordre d'importance*. A la rigueur, pour les terrains incomplets, on peut mentionner, à la suite du nom générique, les éléments accessoires dont la dose excède 5 pour 100. On dirait, par exemple, *sol calcaro-humifère* légèrement *sableux*.

II. — Constitution minéralogique.

Les minéraux constitutifs des roches primitives offrent une résistance très inégale aux actions désagrégeantes. Et si quelques-uns sont aujourd'hui complètement ou partiellement décomposés, d'autres n'ont encore subi aucune altération apparente. C'est pourquoi M. L. Cayeux — qui a soigneusement étudié les roches sédimentaires, et, plus récemment, la constitution minéralogique des terres arables (1) — classe les minéraux du sol en trois groupes :

1° Les *minéraux inaltérables* par essence, tels que le *quartz*, la *tourmaline* et le *zircon*, qui ne se rencontrent qu'à l'état d'éléments intacts dans les résidus de décomposition des roches;

2° Les *minéraux solubles : apatite* et *calcite*, qui disparaissent progressivement par dissolution lente et sans jamais laisser de produits d'altération;

3° Les *minéraux décomposables*, comme les *feldspaths* et les *micas*, qui cèdent une ou plusieurs bases : chaux, potasse, soude, etc., et laissent des *produits épigéniques* ou de décomposition.

---

(1) *Revue de Viticulture*. Année 1907.

Aperçu historique. — A ma connaissance, c'est le comte DE GASPARIN qui s'est occupé le premier de l'étude micrographique du sol. Après avoir séparé par lévigation les particules terreuses, un examen microscopique lui révéla dans chacun des lots extraits d'une terre du *Bordelet* (commune de Saint-Just, département de l'Ardèche) la présence constante du *quartz*, du *feldspath*, du *mica*, des *grenats*, de l'*olivine*, de la *calcite* et des autres minéraux des roches volcaniques. La citation suivante montre toute l'importance que DE GASPARIN attachait à ce genre d'études :

« *Forme des particules.* — Avant la lévigation, les plus « gros fragments étaient recouverts d'une poussière qui « empêchait d'en distinguer les formes ; tout prenait l'ap- « parence grisâtre de l'argile, si ce n'est dans certaines « terres composées de roches cristallines en décomposi- « tion où le quartz est très abondant relativement aux « autres éléments. Maintenant, la lévigation achevée, on « reconnaît à la loupe ou au microscope plusieurs états « différents des particules.

« 1° Les cristaux de quartz, de mica, sont entiers ou peu « usés ; une partie notable du calcaire est restée en gros « grains ; les éléments de la terre sont à peine mêlés, « surtout dans les terrains qui ont été formés en place et « n'ont pas été transportés par les eaux.

« 2° D'autres fois, les fragments de quartz sont recou- « verts d'une couche noirâtre ou ocreuse que l'eau n'enlève « pas, mais que l'acide nitrique détache. Cette espèce de « rouille est caractéristique des *diluviums anciens*.

« 3° L'enduit des grosses particules n'est que pulvéru- « lent, et, après lévigation, les grains de quartz paraissent « translucides. Dans les deux derniers cas, les particules « sont arrondies, et on voit clairement qu'elles ont été « roulées. Les silex conservent cependant encore leurs « formes tuberculeuses.

« Les matières pulvérulentes se comportent aussi de

« plusieurs manières différentes; les calcaires se grou-
« pent quelquefois en forme de stalactites ou de masses
« figurées; l'argile, en se séchant, se prend en plaques
« unies et solides. Il est impossible d'évaluer la ténacité
« extrême de ses plus petites particules, parce qu'on ne
« parvient jamais, avec les pointes les plus fines, à les sé-
« parer entièrement, et qu'elles paraissent toujours for-
« mer un assemblage de plusieurs particules.

« Le terreau peu consommé conserve encore quelques
« parties de son organisation végétale; c'est ainsi qu'on
« le trouve dans les terrains modernes et les terrains pal-
« ludiens, où les débris végétaux sont parvenus rapide-
« ment à la carbonisation avant d'avoir perdu leurs for-
« mes. Dans les terrains anciens, le terreau apparaît sous
« forme de petits grains charbonneux, roux ou noirâtres.

« On distingue aussi dans certaines terres des débris
« de *tests de mollusques,* qui ont conservé leur apparence
« nacrée : c'est surtout dans les terrains palludiens et dans
« ceux d'eau douce qu'ils sont abondants. Ehrenberg,
« en examinant les craies, a reconnu qu'elles étaient pres-
« que uniquement composées d'une foule de débris de
« mollusques polythalames. Les craies du Midi renfer-
« ment les tests presque entiers, tandis qu'ils sont brisés
« dans celles du Nord.

« Cette découverte indique le degré d'utilité dont peut
« être l'examen microscopique des terres. Aujourd'hui
« que l'on sait que la craie est formée par l'assemblage
« d'une quantité innombrable de petites coquilles, on
« s'explique ce phénomène qui sépare si complètement la
« véritable craie des autres terrains calcaires provenant
« des débris de roches de cette nature.

« L'examen microscopique des terres ne nous a donné
« jusqu'à présent que des résultats généraux : mais il faut
« dire aussi qu'en nous faisant pénétrer plus intimement
« dans la constitution et la structure des terres, cet exa-
« men forme singulièrement le coup d'œil et nous accou-
« tume à juger de leurs qualités par les apparences exté-
« rieures. Il suffit d'un grossissement de 60 à 120 pour
« distinguer parfaitement toutes les parties constituantes
« du sol ; une goutte d'acide nitrique mise en contact

« avec la terre sur le porte-objet achève d'éclaircir tous « les doutes que fait naître une première vue ; et cette « connaissance empirique de la forme et de la situation « des différents éléments de la terre, sans pouvoir être tra- « duite en principe, nous habitue à démêler certains carac- « tères qui, par la suite, analysés avec sagacité, pour- « ront peut-être prendre une grande place dans la « science (1). »

Ces judicieuses observations, malgré la très grande autorité de celui qui les a faites, paraissent avoir été oubliées. Les récents travaux de MM. Delage et Lacatu (2) confirment de tous points les recherches de de Gasparin, et s'ils n'apportent qu'une faible contribution à ce que l'on savait déjà, ils ont du moins le mérite d'avoir de nouveau attiré l'attention des agronomes sur la constitution minéralogique du sol, et c'est cela qui importe le plus. Qu'on examine la terre en coupes minces ou directement après un décapage préalable, ainsi que je le fais moi-même; qu'on emploie le microscope ordinaire ou le microscope polarisant, un œil exercé reconnaîtra toujours les principales espèces minérales qui témoignent hautement de l'origine même du sol.

Analyse minéralogique. — L'analyse minéralogique des terres arables peut être *qualitative* ou *quantitative*. Dans le premier cas, elle porte sur l'ensemble des particules terreuses : elle est plus nette et plus apparente (fig. 3) si les particules ont été préalablement décapées par l'acide oxalique étendu, suivant la méthode décrite plus loin; dans le second cas, elle implique nécessairement la séparation et le do-

---

(1) *Cours d'agriculture*, t. I, pp. 173 et suivantes.
(2) C. R. de l'Académie, t. CXXXIX et CXL.

sage des espèces minérales essentielles : *quartz, micas, feldspaths.*

L'examen microscopique révèle de très sensibles différences suivant que la terre est ou n'est pas décapée... Dans un sol traité par l'acide oxalique, les espèces minérales apparaissent nettement : les matières argileuses de couleur jaunâtre et les substances

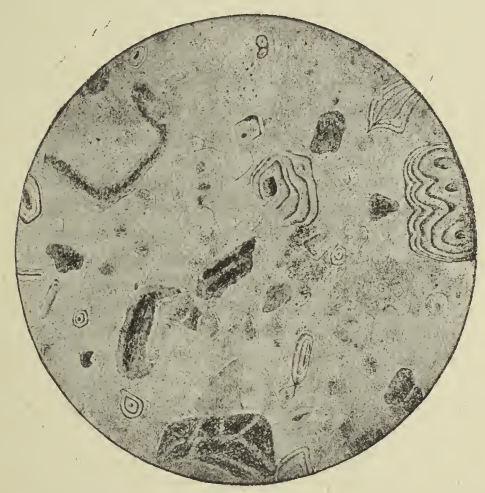


FIG. 3. — *Sable grossier décapé* vu au microscope polarisant (lumière parallèle, grossissement 70). Le *mica* noir et le *quartz* — avec ses anneaux colorés — sont très abondants ; les *feldspaths* sont déjà rares.

humiques d'un noir foncé sont bien séparées des grains sableux, qui donnent en lumière polarisée des teintes parfaites. Faute de décapage, au contraire, la plupart des particules ont l'aspect terne : une couche ocreuse enveloppe les grains de mica ou de feldspath, et s'étend même sur le quartz.

Les *déterminations qualitatives* fournissent évidemment des renseignements précis sur l'origine de la

terre arable; mais quand on veut savoir dans quel rapport les MINÉRAUX ORIGINELS varient d'une terre à l'autre ou d'un sable à l'autre, il faut de toute nécessité en déterminer exactement le poids : l'*analyse minéralogique quantitative* devient alors absolument indispensable. Comment peut-on l'effectuer?

Procédés de séparation. — La méthode de séparation que j'ai adoptée comprend deux séries d'opérations ayant pour objet : la première, d'isoler les éléments originels, les sables non encore altérés par les agents chimiques ; la seconde, de séparer les espèces minérales que ces éléments contiennent en diverses proportions.

a) SÉPARATION DES SABLES. — Nous avons vu que le sable grossier et le sable fin, tels qu'on les obtient actuellement par la méthode d'analyse physique, ne sont jamais purs; chaque grain sableux se trouve recouvert d'un *enduit colloïdal* qui résiste énergiquement à l'action désagrégeante de l'eau. Pour détruire ce revêtement protecteur, pour *décaper* les particules terreuses, j'utilise avantageusement l'acide oxalique. Voici, du reste, l'ordre des traitements successifs qui permettent d'obtenir des sables d'une remarquable pureté.

Je prends un poids connu de terre fine et sèche ; si les débris végétaux y sont abondants, je les élimine préalablement en triturant la matière dans une solution de nitrate de calcium (à 50 pour 100) ayant une densité supérieure à celle de l'humus. Cela fait, je procède au décapage : le résidu terreux est attaqué lentement, à l'ébullition, par une quantité d'acide oxalique telle qu'il reste encore, après la décomposition du calcaire, une partie d'acide pour dix parties de terre environ. On prolonge l'attaque, au bain de sable, pendant plus d'une heure s'il le faut; on filtre et on lave le résidu à l'eau azotique (pour entraîner l'oxalate de calcium), puis à l'eau distillée. La terre est ensuite recueillie soigneusement et mise en digestion, un jour ou deux, dans une solution ammoniacale : l'ammoniaque dissout les substances humiques. Les éléments sableux ou silicatés sont ensuite immergés dans une solu-

tion d'une densité égale ou supérieure à celle de l'argile et séparés au *centrifugeur :* l'argile reste en suspension ou remonte en haut, tandis que les sables se rassemblent dans le bas. A la vitesse de 1000 tours, une demi-heure de rotation suffit, en général, pour une bonne séparation; on décante et l'on recommence plusieurs fois la séparation jusqu'à ce que le liquide, après turbinage, soit d'une limpidité parfaite. Les matières sableuses, privées ainsi de toute trace d'argile, sont recueillies, séchées et pesées;

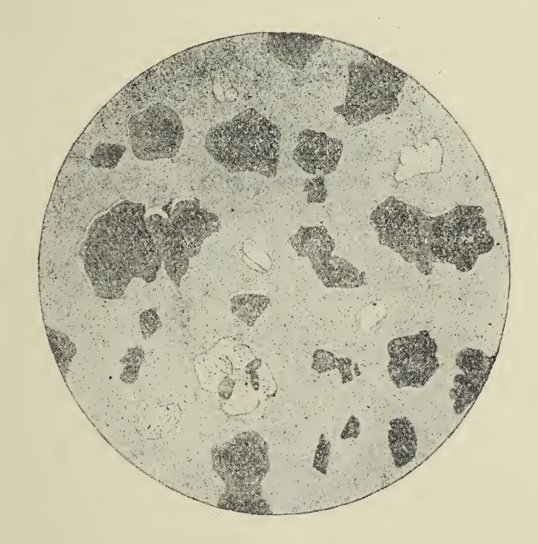


FIG. 4. — *Micas* noir et blanc, extraits d'un sable grossier granitique, vus au microscope (grossissement 70).

on peut en calciner modérément une partie et peser de nouveau pour voir si les substances organiques ont été complètement éliminées.

b) SÉPARATION DES ESPÈCES MINÉRALES. — Pour déterminer ensuite la proportion de mica, de feldspath, de quartz ou de toute autre espèce minérale originelle existant dans

une roche donnée, on a conseillé l'emploi de solutions de densités intermédiaires : soit la *liqueur de Thoulet* (iodure mercurique dissous dans l'iodure de potassium), soit l'*iodure de méthylène,* dont on modifie le poids spécifique en ajoutant une quantité convenable de *xylène.* Je me sers de la même méthode en m'aidant toujours du centrifugeur afin d'accélérer les séparations.

Après avoir pulvérisé convenablement les sables grossiers, j'en prélève 1 gramme ou 0 gr. 5 que j'introduis dans le tube du centrifugeur, d'abord en mélange avec le liquide le plus dense (2,8) de façon à séparer les *éléments ferromagnésiens* (fig. 4) ; les minéraux les plus légers, qui se rassemblent à la surface, passent ensuite successivement dans des solutions de densité décroissante. Si l'on veut bien isoler les espèces minérales, il faut centrifuger deux ou trois fois de suite, avec la même solution, en ayant soin de désagréger ou d'immerger chaque fois les matériaux légers qui pourraient entraîner, dans leur ascension rapide, des éléments plus lourds. Une rotation de dix minutes suffit ordinairement pour les séparations ; les produits qui tombent au fond de chaque solution sont recueillis, lavés, séchés et pesés. Il convient de s'assurer toujours de leur pureté par un examen microscopique; si la séparation laissait à désirer, on la recommencerait en modifiant un peu la densité des liquides ou en pulvérisant plus finement les matériaux recueillis (1).

On arrive facilement, après quelques tâtonnements inévitables, à d'assez bons résultats. C'est ainsi que la séparation du *quartz* (fig. 5) et du *feldspath orthose,* qui est pourtant l'une des plus délicates, peut se faire

---

(1) La pulvérisation des diverses espèces minérales n'est pas également facile; les lamelles flexibles des micas se montrent résistantes, il est préférable de les séparer avant de porphyriser les sables grossiers. Le résidu qui surnage — lors du premier traitement à la solution dense — renferme les éléments quartzeux et feldspathiques ; on doit le recueillir, le laver, le sécher et le pulvériser ensuite (ou même le séparer en plusieurs lots par des tamisages convenables), de manière à ne centrifuger que des poudres physiquement homogènes.

de façon très convenable par cette méthode d'analyse (1).



FIG. 5. — Fragments de *quartz*, extraits d'un sable granitique, vus en lumière polarisée.

Données numériques. — J'ai appliqué ces procédés de séparation à l'étude des éléments siliceux et silicatés provenant de différents sols. A titre d'exemple, voici les résultats obtenus avec une terre granitique de la Creuse (sol authigène) et une terre de Grignon (sol allothigène) :

	POUR 100 DE SABLE GROSSIER	
	Terre de la Creuse	Terre de Grignon
Éléments micacés	3,1	0,4
Éléments quartzeux . . .	75,3	81,9
Éléments feldspathiques. .	20,6	13,7

(1) C. R. de l'Académie des Sciences, t. CXL, p. 1111.

	POUR 100 DE SABLE FIN	
	Terre de la Creuse	Terre de Grignon
Éléments micacés	0,9	rares
Éléments siliceux	85,3	93,1
Éléments feldspathiques .	12,6	6,5

La roche granitique formant le sous-sol de la terre de la Creuse, analysée d'autre part, contenait *pour 100 :*

Éléments micacés	12,6
Éléments quartzeux	55,4
Éléments feldspathiques	31,8

Il résulte de ces différents essais que la proportion des espèces minérales attaquables (éléments silicatés divers) est toujours plus faible dans le sol que dans les roches originelles ; elle diminue très sensiblement à mesure que les composants deviennent plus fins : le sable des limons ne contient plus de micas, et la proportion de feldspath y est bien moindre que dans le sable grossier. Les sols de transport, presque essentiellement formés de terre fine — comme celui de Grignon — sont aussi moins riches en mica et en feldspath.

III. — Constitution chimique.

La terre arable ne sert pas exclusivement de support aux plantes ; elle est, à d'autres égards, un vaste *magasin d'approvisionnement*, que les racines explorent en tous sens, et un *laboratoire mystérieux* où se

préparent, où s'élaborent les solutions nourricières. De fait, en raison de sa constitution complexe, le sol peut toujours mettre à la disposition des plantes une certaine quantité de matériaux alimentaires. On y trouve, en proportions variables, du *carbone*, de l'*azote*, de l'*acide phosphorique*, de l'*acide sulfurique*, de la *silice*, du *fer*, du *manganèse*, de l'*alumine*, de la *chaux*, de la *magnésie*, de la *potasse*, etc. Et si nombre de ces substances y sont assez abondantes pour parer aux besoins impérieux de la végétation, il en est d'autres qui manquent parfois ou qui, revêtant une *forme passive*, ne sont pas immédiatement assimilables. L'étude chimique du sol présente donc un intérêt de tout premier ordre.

Analyse chimique. — Si la séparation des composants mécaniques nous fait connaître la structure des terrains, elle ne fournit aucune indication sur l'abondance ou la rareté des *principes fertilisants*. A cet égard, l'*analyse chimique* seule peut nous donner des renseignements précis. En quoi consiste cette analyse ? Quel est son but et quels sont ses moyens ?

Analyser chimiquement un sol, c'est en déterminer la composition élémentaire par l'isolement respectif de tous les corps, solubles ou non, qui s'y trouvent contenus. Ainsi comprise, l'analyse sera *intégrale* ou *complète*. Dans la pratique ordinaire, on se contente de doser l'*azote*, l'*acide phosphorique*, la *chaux* et la *potasse*, qui sont les agents essentiels de la fertilité, je veux dire ceux dont l'apport devient parfois nécessaire. Mais ces dosages partiels ne suffisent pas toujours... Pour bien connaître la terre, quant à sa constitution chimique, il faut effectuer la séparation intégrale des éléments. Et d'abord quels sont ces éléments et sous quelle forme les rencontre-t-on ?

L'épuisement des terres à l'eau ne fournissant qu'un très faible résidu, on est en droit de dire que la presque totalité des composants sont insolubles, ce qui est fort heureux d'ailleurs. D'autre part, en raison même de l'existence de l'humus — dont les cendres contiennent toujours des sels minéraux divers — nous admettrons que les principes fertilisants se trouvent ordinairement répartis entre les composants essentiels du sol, que ceux-ci soient de nature organique ou inorganique.

Ainsi, à part l'azote — qui appartient presque entièrement aux débris végétaux et aux substances humiques — les principes fertilisants se trouvent à l'état de combinaisons insolubles dans les éléments silicatés et organiques. Pour bien les dégager, il faut recourir à des réactifs violents, alcalins ou acides, susceptibles de les dissoudre ou de les décomposer.

Sans entrer dans le détail des manipulations, je crois devoir indiquer ici la marche générale de chaque dosage. Bien que cet exposé présente quelque aridité — surtout pour les personnes encore peu familiarisées avec la science chimique — j'en recommande la lecture à tous ceux qui veulent interpréter les résultats analytiques servant de base pour l'appréciation de la fertilité. Afin d'éviter les redites, je rappellerai une fois pour toutes que *les nombres obtenus à l'analyse doivent être toujours rapportés à 1000 grammes de terre fine séchée à 110 degrés.* Si le sol contient des graviers ou des cailloux, on corrigera ces nombres en tablant sur la proportion de terre fine existant réellement dans un kilogramme de matière sèche.

Dosage intégral des éléments. — Les méthodes analytiques ordinaires, basées sur l'emploi des acides chlorhydrique ou azotique, ne donnent pas, ainsi que l'ont

montré MM. BERTHELOT et ANDRÉ, des résultats absolument rigoureux. C'est pourquoi nous croyons préférable d'indiquer, en premier lieu, les procédés rationnels permettant de faire le dosage des *corps métalloïdiques* et des principaux *corps métalliques*.

a) *Dosage des corps métalloïdiques*. — Nous rattachons à ce groupe, le *carbone* et l'*acide carbonique*, l'*azote*, la *silice*, les *acides phosphorique* et *sulfurique*, etc.

1° DOSAGE DU CARBONE. — Dans le sol, le carbone appartient soit aux matières humiques (carbone organique), soit aux carbonates terreux (carbone minéral).

a) *Acide carbonique*. — Le dosage du carbone minéral ou de l'acide carbonique des carbonates s'effectue très aisément, à l'aide des calcimètres divers, en traitant par un acide un poids connu de terre sèche et mesurant le volume gazeux obtenu, dont on calcule ensuite le poids. Pour doser plus rigoureusement ce corps, il faut utiliser la trompe à mercure, qui permet de recueillir exactement le gaz dégagé que l'on absorbe, après l'avoir mesuré, avec une solution concentrée de potasse.

b) *Carbone organique*. — Pour l'analyse du carbone organique, M. BERTHELOT conseille d'opérer par incinération, dans un courant d'oxygène pur, sur 10 grammes de terre fine séchée à 110° et placée dans une nacelle de platine qu'on engage dans le tube à combustion. Peu à peu, sous l'influence de la chaleur, la matière organique est détruite : le carbone s'en dégage à l'état d'acide carbonique, et l'hydrogène à l'état d'eau. On recueille l'eau dans des tubes contenant de la ponce sulfurique, et l'acide carbonique dans des tubes à potasse. Chaque série de tubes ayant été préalablement pesée, on les repèse à la fin de l'expérience, et la différence de poids correspond à la quantité de gaz dégagé (1). Toutefois, comme les carbonates terreux peuvent se décomposer partiellement au cours de l'incinération, il faut doser l'acide carbonique dans la terre et dans le résidu incinéré. La différence trouvée entre ces deux dosages donnera la proportion de carbone minéral qui s'est dégagé pendant la calcination. En soustrayant ce nombre de celui précédemment obtenu, on aura exactement le poids de l'acide carbonique formé dans la combustion des matières organiques. On en déduit ensuite, par le calcul, la quantité de carbone appartenant aux matières humiques.

---

(1) La différence de poids des tubes à ponce sulfurique permettrait de calculer la quantité d'hydrogène provenant de la combustion des matières organiques.

c) *Humus.* — *On obtiendrait approximativement la proportion d'*HUMUS en doublant le carbone organique. M. BERTHELOT préfère additionner les quantités respectives de carbone et d'azote, puis augmenter de *soixante centièmes* le nombre ainsi trouvé.

2° DOSAGE DE L'AZOTE. — Partout où la nitrification est active, il existe une certaine quantité d'azote à l'état *ammoniacal* et à l'état *nitrique ;* mais, comparativement à la richesse azotée totale du sol, ces quantités sont toujours très faibles, et il n'y a qu'au cas où elles seraient de nature à fausser les résultats du dosage de l'azote organique qu'il devient parfois nécessaire de laver préalablement la terre.

a) *Azote organique.* — Pour doser l'*azote organique,* on le transforme en azote ammoniacal : soit en employant la *méthode à la chaux sodée*, soit en utilisant le *procédé Kjeldhal.* M. BERTHELOT recommande la première méthode, mais à condition d'opérer dans un courant lent d'hydrogène humide, afin d'éviter toute action oxydante et tout séjour prolongé des gaz dans le tube rouge — ce qui exposerait à décomposer une partie de l'ammoniaque. L'action de l'humidité concourt, d'ailleurs, à la transformation des cyanures et des composés amidés.

Le dosage s'effectue sur 5 ou 10 grammes de terre sèche intimement mélangée à de la chaux sodée en poudre. Le mélange est introduit dans un tube de verre vert qu'on place ensuite sur la grille à analyse. On chauffe modérément au début ; l'ammoniaque qui se dégage est recueilli dans l'acide sulfurique titré, coloré par quelques gouttes de tournesol ou de méthylorange. A la fin de l'opération, on balaye les gaz restant par un courant d'hydrogène produit à l'aide d'un appareil spécial, ou bien en calcinant un mélange d'acide oxalique et de chaux placé à l'une des extrémités du tube. On titre ensuite la liqueur sulfurique avec une solution alcaline, et on calcule la proportion d'azote (1).

Dans le *procédé Kjeldhal*, la terre est attaquée dans un matras par de l'acide sulfurique concentré et pur, en présence d'une goutte de mercure. On chauffe avec précaution ; peu à peu, le mélange noircit, et la matière se désagrège : l'azote organique passe à l'état d'azote ammoniacal. Quand le liquide est limpide et bien décoloré, la transformation est complète. On se trouve alors en présence d'un mélange contenant, avec les débris terreux, de l'acide sulfu-

---

(1) Soient V le volume de la *solution alcaline* nécessaire à la neutralisation directe de 10^{cc} d'acide décinormal correspondant à 0,014 d'azote, v le volume employé pour la même opération. Après la distillation de l'ammoniaque, la proportion x d'azote sera donnée par la formule :

$$x = \frac{(V - v)\ 0{,}014}{V}$$

rique en excès, du sulfate de mercure, du sulfate d'ammoniaque et un sulfate double de mercure et d'ammoniaque. Après refroidissement, on transvase le tout dans un ballon d'un litre où l'on a mis environ 150 cc. d'eau distillée. On ajoute successivement de l'hypophosphite de sodium, qui réduit les sels de mercure, puis un excès de soude. Il n'y a plus qu'à distiller le liquide à l'appareil Schlœsing modifié par Aubin, et à recueillir l'ammoniaque dans un volume connu d'acide sulfurique titré. On détermine ensuite la proportion d'ammoniaque ou d'azote comme il a été dit précédemment.

b) *Azote ammoniacal.* — Le dosage de l'ammoniaque contenue dans le sol n'est jamais d'une exactitude rigoureuse. Dans la pratique courante, on se contente de distiller (au serpentin Schlœsing) un mélange de 200 grammes de terre et de 500 cc. d'eau distillée environ additionné d'un gramme de magnésie calcinée. La magnésie déplace l'ammoniaque qu'on recueille dans 10 cc. d'acide sulfurique titré décinormal. On termine l'opération comme pour les dosages précédents.

c) *Azote nitrique.* — Les nitrates existent dans toutes les terres fertiles où la nitrification se produit normalement. On les dose dans les eaux d'épuisement, provenant de 100 grammes de terre, après concentration et addition d'acide acétique. Le procédé en usage repose sur la réduction de l'acide azotique en présence d'un acide minéral et d'un sel ferreux ; il se fait alors un composé gazeux — le bioxyde d'azote — qu'on recueille dans une éprouvette graduée. Du volume obtenu, on déduit ensuite la proportion correspondante d'azote nitrique.

L'opération doit être conduite de la manière suivante : dans un ballon d'un quart de litre environ, on introduit 30 cc. de chlorure ferreux et à peu près autant d'acide chlorhydrique. On ferme le ballon avec un bouchon en caoutchouc portant un tube à entonnoir avec robinet et un tube de dégagement qui plonge dans une terrine remplie d'eau ou dans une cuve à mercure. Le robinet étant fermé, on fait bouillir le liquide et, dès que l'air est complètement chassé, on introduit goutte à goutte la solution nitrique.

On lave la capsule à plusieurs reprises avec de l'eau aiguisée d'acide chlorhydrique et on introduit, avec les mêmes précautions, les eaux de lavage dans l'appareil. Quand l'opération est terminée, on mesure le volume gazeux et on détermine son poids (1), qu'on multiplie par 0,466 pour avoir l'azote correspondant.

(1) Pour cela on fait usage de la formule connue :

$$P = V \left[\frac{(H - f) \times 0{,}001293 \times 1{,}039}{760\,(1 + \alpha\,t)\,.} \right]$$

3° Dosage de la silice. — Bien que les silicates soient les composés minéraux dominants du sol, on a rarement besoin de doser la silice, qui semble ne jouer qu'un rôle secondaire dans la nutrition des plantes. Toutefois, quand les recherches scientifiques l'exigent, on peut avoir besoin de séparer ce corps. Pour cela, on fond au rouge, dans un creuset de platine, un ou deux grammes de terre sèche mélangée à cinq fois son poids de carbonate de soude ou de potasse pur. La fusion détermine la formation de *silicates alcalins* solubles que l'on reprend par l'eau et dont on précipite la silice par un acide. Le précipité gélatineux est recueilli, lavé, incinéré et pesé.

4° Dosage du soufre et du phosphore. — Quand on veut doser rigoureusement ces corps, il faut tenir compte de l'existence des composés *sulfoconjugués* et *phosphoconjugués* que les acides attaquent très imparfaitement, mais qui se dissolvent assez vite dans les alcalis.

M. Berthelot conseille d'incinérer la terre fine dans un tube à combustion (comme pour le dosage du carbone), mais en présence du carbonate de soude, ou bien à l'air libre, en projetant dans la masse du nitrate de potasse.

Dans ces conditions, le soufre et le phosphore des combinaisons organiques ne se perdent pas ; ils passent à l'état de *sulfates* et de *phosphates*, et il suffit de reprendre la matière par un acide étendu, à chaud, puis de doser ces éléments, par les méthodes ordinaires, dans la solution obtenue. Après filtration et lavage du résidu, on amène les liquides à un volume connu (200 cc. par exemple) qu'on partage ensuite pour les besoins de l'analyse.

a) *Acide sulfurique.* — On le dose sur 100 cc. de liqueur acide, en précipitant par le *chlorure* ou l'*azotate de baryum*. Il se fait ainsi du sulfate de baryte insoluble. Quand la précipitation est complète, on laisse le liquide à l'étuve pendant quatre ou cinq heures (quelquefois plus) pour bien rassembler le précipité et obtenir par la suite une filtration parfaite. Cela fait, on recueille le précipité sur un filtre rond à analyse ; on lave soigneusement le vase et le précipité à l'eau chaude acidulée (contenant 10 pour 100 d'acide chlorhydrique pur), puis à l'eau bouillante jusqu'à ce que le liquide filtré ne précipite plus par l'acide sulfurique (ce qui prouve que le chlorure de baryum est complètement entraîné) et par l'azotate d'argent (preuve certaine de l'élimination des chlo-

---

dans laquelle H représente la pression barométrique, f la force élastique de la vapeur d'eau à la température t, et α le coefficient de dilatation des gaz. On peut opérer aussi par comparaison avec une solution de nitrate de titre connu.

rures et de l'acide chlorhydrique ayant servi au premier lavage). On sèche le filtre et son contenu à l'étuve, puis on détache soigneusement le précipité. Le filtre est calciné séparément, dans une capsule tarée, et les cendres grises obtenues sont additionnées de quelques gouttes d'acide azotique ou même d'acide sulfurique et incinérées de nouveau. Cela fait, on verse le précipité dans la capsule, on calcine et on pèse le tout après refroidissement. Du poids de sulfate de baryte obtenu, on déduit la proportion correspondante d'acide sulfurique (en SO^3) en multipliant par le coefficient 0,343.

b) *Acide phosphorique.* — On le sépare généralement de la solution azotique à l'état de *phosphomolybdate d'ammoniaque.* Il importe surtout que la silice ait été parfaitement insolubilisée. En cas de doute, il faudrait évaporer la solution acide, incinérer le résidu et reprendre par l'acide nitrique.

La liqueur azotique traitée par le *nitromolybdate d'ammoniaque* (50 cc. environ) (1) doit être maintenue pendant douze heures à la température de 50° environ, pour que la précipitation soit complète. Le précipité jaune de phosphomolybdate est alors recueilli sur un filtre taré et soigneusement lavé avec de l'eau azotique à 5 pour 100. Après avoir fait tomber quelques gouttes d'eau sur le papier, pour entraîner l'acide azotique qui l'imprègne, on sèche à l'étuve, à la température de 60° environ, jusqu'au moment où la coloration bleue apparaît. En multipliant par 0,38 le poids de phosphomolybdate, on obtient la proportion correspondante d'acide phosphorique (2).

b) *Dosage des oxydes métalliques.* — Pour effectuer la séparation des oxydes métalliques : oxydes de fer et d'aluminium, chaux, magnésie, potasse, etc., il faut de toute nécessité détruire les combinaisons silicatées. On y parvient assez facilement par l'emploi de l'acide fluorhydrique ou du fluorhydrate d'ammoniaque (procédé Rose), qui attaquent énergiquement la silice en formant des vapeurs blanches de fluorure de silicium. Cette réaction doit toujours être faite dans une capsule de platine et sous une hotte à fort tirage,

---

(1) On prépare cette liqueur en dissolvant 100 grammes *d'acide molybdique* dans 400 grammes d'ammoniaque (de densité 0,95) et en ajoutant ensuite 1.500 grammes d'acide azotique (de densité 1,20). On abandonne plusieurs jours le liquide dans un endroit tiède et on décante ensuite.

(2) On peut aussi dissoudre le phosphomolybdate dans l'ammoniaque, le transformer en *phosphate ammoniaco-magnésien,* en y ajoutant du chlorure de magnésium et un sel ammoniacal, ou bien 10^{cc} de liqueur de Joulie — et continuer comme il est dit au dosage de la *magnésie.* Le poids de pyrophosphate sera multiplié par 0,639. Cette méthode est plus exacte.

car il est dangereux de respirer les vapeurs qui se dégagent. Nous avons adopté de préférence le procédé Rose.

On prend 3 ou 5 grammes de terre fine sèche et on la mélange, dans une capsule de platine, avec 5 à 6 fois son poids de fluorhydrate d'ammoniaque pur ; on ajoute ensuite quelques centimètres cubes d'eau pour obtenir une masse pâteuse homogène, et on chauffe modérément au début... L'attaque se fait; et quand le dégagement des vapeurs ne se produit plus, on traite par l'acide sulfurique, qui doit dissoudre intégralement le résidu (1). Dans la solution ramenée à un volume connu (250 centimètres cubes), on dose ensuite les oxydes métalliques par les méthodes ordinaires de séparation que nous allons décrire très succinctement.

1° Dosage de l'alumine et du fer. — Sur une première prise d'échantillon (50 cc.) on peut doser le *fer* par la méthode volumétrique à l'aide du caméléon minéral ou permanganate de potassium. A cet effet, on ajoute d'abord des petits fragments de zinc à la liqueur sulfurique; il se produit ainsi un dégagement d'hydrogène qui réduit les sels ferriques en sels ferreux ; quand la liqueur est bien décolorée — le zinc étant complètement dissous — on ajoute de l'eau distillée pour compléter le volume à 300 cc. environ, puis on verse goutte à goutte, à l'aide d'une burette, la solution de permanganate titré (3 gr. 162 par litre) jusqu'à production d'une teinte rose persistante. Du nombre de centimètres cubes de permanganate employé, on déduit la proportion de fer en multipliant par 0,0056.

Pour doser l'*alumine*, on prélève 25 cc. de la liqueur primitive; on peroxyde le fer par ébullition en présence de l'acide azotique et on neutralise ensuite par de l'ammoniaque. Il se forme un abondant précipité d'hydrates alumineux et ferrique. On le recueille sur un filtre à analyse, on le lave à l'eau bouillante, on sèche, on incinère et on pèse. En retranchant du poids total la proportion de fer, calculé en sesquioxyde (Fe^2O^3), on obtient la quantité d'alumine (2).

2° Dosage de la chaux et de la magnésie. — On sépare habituellement la chaux à l'état d'oxalate, et la magnésie à l'état de phosphate ammoniaco-magnésien.

Pour doser la *chaux*, on prélève 50 cc. de la solution primitive.

(1) Si la dissolution était incomplète, il faudrait traiter le résidu par du fluorhydrate d'ammoniaque et recommencer ainsi l'opération.

(2) On pourrait éliminer l'alumine et le fer à l'état de phosphates de sesquioxyde, dans une liqueur nettement acétique. Dans ce cas, on neutraliserait par l'ammoniaque la solution primitive, on acidifierait ensuite fortement avec l'acide acétique et l'on précipiterait par le phosphate de soude.

Après avoir neutralisé par addition d'ammoniaque, on redissout le précipité dans l'acide acétique (si la dissolution est incomplète, il faut filtrer), puis on ajoute au liquide acide de l'oxalate d'ammoniaque en léger excès. Quand l'alumine et le fer abondent, il vaut mieux acidifier par l'acide oxalique et ajouter directement l'oxalate ammoniacal. Un précipité blanc se forme aussitôt ; on chauffe modérément, on filtre et on lave à l'eau chaude. Après dessiccation, on incinère : l'oxalate se transforme alors en carbonate calcique, et comme celui-ci peut se décomposer partiellement, on ajoute, à la fin, du carbonate d'ammoniaque pour recarbonater la chaux vive qui a pu se former. Il suffit ensuite de calciner légèrement, pour chasser le sel ammoniacal, puis de peser le résidu... En multipliant le poids du carbonate de chaux par 0,56, on aura la proportion correspondante de chaux (en CaO).

La *magnésie* peut se doser dans le liquide provenant de l'opération précédente. Dans la liqueur obtenue, après concentration, on ajoute de l'ammoniaque et du phosphate de soude ou d'ammoniaque ; on agite, il se fait alors un précipité cristallin de phosphate ammoniaco-magnésien. Après douze heures de repos, le précipité est recueilli sur un filtre à analyse, lavé à l'eau ammoniacale (20 pour 100), séché et incinéré : il se fait du pyrophosphate de magnésie qu'on pèse ensuite. Il suffit de multiplier le nombre trouvé par 0,36 pour avoir la quantité de magnésie (MgO).

3° Dosage de la potasse et de la soude. — La séparation des alcalis fixes est assez laborieuse. Sur 100 cc. de la liqueur primitive, on ajoute d'abord du chlorure de baryum en quantité suffisante pour précipiter tous les acides susceptibles de former des sels insolubles. Cela fait, on met un excès d'eau de baryte qui précipite, à l'état d'hydrates insolubles, la chaux, les oxydes de fer et d'alumine, etc... On chauffe modérément puis on filtre. Dans le liquide filtré — contenant la potasse, la soude, l'excès de baryte et de chlorure de baryum — on élimine la baryte en faisant passer un courant d'acide carbonique, et le chlorure de baryum en traitant par le carbonate d'ammoniaque. Après avoir rassemblé le précipité par la chaleur, on filtre et on lave. Le liquide est ensuite concentré, évaporé à sec et légèrement calciné pour l'élimination des sels ammoniacaux. On reprend par l'eau (si tout ne se dissout pas, on filtre), puis on ajoute un peu d'acide chlorhydrique pour transformer les alcalis en chlorures ; on évapore à sec et l'on détermine ensuite le poids (P) des chlorures. On traite par un peu d'eau bouillante et par un léger excès de chlorure de platine qui donne naissance à des chloroplatinates de sodium et de potassium. Le liquide est évaporé à sec au bain-marie. On épuise le résidu par un mélange d'alcool et d'éther ; le chloroplatinate de sodium se dissout. Quand l'épuisement est complet, il ne reste que du chlo-

roplatinate de potassium ; on l'entraîne par l'eau bouillante dans une solution chaude de formiate de soude qui réduit le sel en donnant du platine (1). On recueille ce platine, on incinère et on pèse. Le poids obtenu multiplié par 0,4835 donne la proportion correspondante de potasse.

On dose la *soude* par différence, en retranchant du poids (P) celui du chlorure de potassium, calculé d'après la dose de potasse. On obtient ainsi le poids du chlorure de sodium, dont on déduit facilement la quantité de soude (en Na^2O).

Méthodes analytiques ordinaires. — Les procédés de dosage adoptés dans les laboratoires et les stations agronomiques diffèrent des précédents, au point de vue de l'attaque, en ce qui concerne le soufre, le phosphore et les oxydes métalliques. On se contente de traiter la terre fine et sèche au bain de sable pendant cinq heures par l'acide azotique concentré. Le résidu évaporé à sec et calciné (pour insolubiliser la silice) est ensuite repris par l'acide nitrique étendu. On filtre, et dans la liqueur filtrée — complétée à un volume connu — on peut doser les corps en employant les méthodes de séparation que nous avons décrites. Mais si le comité des stations agronomiques a donné de semblables instructions, s'il a laissé de côté l'analyse intégrale du sol, c'est parce qu'il a jugé préférable — pour la pratique agricole — de limiter les dosages à la détermination des matériaux susceptibles d'être assimilés ou de devenir promptement utilisables par les végétaux.

Malgré de louables efforts, il ne semble pas que le problème ait été convenablement résolu. L'emploi des acides violents ne permettra jamais d'atteindre le but poursuivi. Dès lors, les méthodes analytiques ordinaires — sauf pour les dosages du carbone et de l'azote — ont le double défaut de ne pas nous renseigner de façon précise sur la proportion d'éléments assimilables ni sur la richesse globale du sol, la constitution de ce dernier ne pouvant être établie que par le dosage intégral.

(1) On peut avantageusement faire la réduction en solution chlorhydrique à l'aide d'un ruban de magnésium.

Pour bien se convaincre de l'insuffisance des procédés ordinaires d'analyse, il suffit de jeter un coup d'œil sur le tableau suivant, où se trouvent consignés les résultats obtenus par MM. Berthelot et André avec une terre de Meudon. Ces savants ont trouvé, en effet, que 1000 grammes de terre fine et sèche contenaient :

SUBSTANCES DOSÉES	PROPORTION INTÉGRALE DES CORPS	MATIÈRES SOLUBLES DANS L'ACIDE CHLORHYDRIQUE		
		A FROID	A L'ÉBULLITION	
		TERRE NORMALE	TERRE NORMALE	TERRE INCINÉRÉE
Ac. phosphorique (P^2O^5).	2,920	1,090	1,830	1,890
Ac. sulfurique (SO^3) . .	1,163	»	0,533	0,907
Potasse (K^2O)	8,860	0,210	1,490	1,760
Soude (Na^2O)	2,110	0,240	0,320	0,450
Magnésie (MgO) . . .	0,870	0,330	»	0,670
Chaux (CaO)	11,600	8,790	11,200	10,060
Alumine (Al^2O^3) . . .	39,500	1,020	10,090	26,310
Oxyde ferrique (Fe^2O^3 .	21,500	2,960	14,010	16,780

Les différences sont énormes.... En aucun cas les nombres obtenus ne se rapprochent sensiblement de ceux correspondant à l'analyse intégrale. Les matières organiques gênent l'action de l'acide chlorhydrique, et il faut de toute nécessité incinérer le sol pour détruire les combinaisons organico-minérales. Non seulement le dosage rigoureux du *soufre* et du *phosphore* l'exige, mais aussi la séparation des oxydes métalliques.

En traitant la terre par l'*eau régale* (mélange d'acide azotique et d'acide chlorhydrique), on n'obtient pas

des résultats plus précis. C'est du moins ce qui résulte manifestement des essais que nous avons effectués, M. Aurousseau et moi, sur un sol granitique de la Creuse contenant 9,72 de potasse totale par kilogramme :

	Potasse soluble dans l'eau régale	
	pour 1000 de terre sèche	pour 100 de potas. totale
Après 5 heures d'attaque à 90°	1,536	15,80
Après 5 heures d'attaque à 110°	1,873	19,27
Après 8 heures d'attaque à 90°	1,920	19,75
Après 6 heures d'attaque à 110°	2,064	21,23

On voit combien influent la température et la durée de l'attaque. Quand on porte la température de 90 à 110 degrés, la proportion de potasse dissoute augmente de 15 pour 100 environ. A température égale, si l'on prolonge la réaction pendant 3 heures — en passant de 5 heures à 8 heures — on trouve une augmentation de 25 pour 100. Ce n'est donc pas sans raison que le « *Comité consultatif des stations agronomiques* » a fixé invariablement à cinq heures la durée de l'attaque par l'acide nitrique.

Ainsi, pour connaître d'une manière absolument rigoureuse la constitution du sol, il faut recourir à l'analyse intégrale. Elle seule permet de libérer tous les principes qui sont engagés dans les combinaisons complexes (silicates et humates polybasiques). Les oxydes métalliques, en particulier, ne sont jamais dosés convenablement par les procédés habituellement suivis. « Cette impuissance des méthodes ordi-
« naires, écrit M. Berthelot, est imputable à l'état de
« combinaison de ces bases, formant dans la terre

J. Dumont

"La Terre Arable"

p. 36
55-56
98-99
102-103
159-161
184-185
219-220
269-270
275-

« des silicates divers avec excès d'acide silicique. On « a admis souvent que ces silicates se partageaient en « deux groupes : les uns hydratés et comparables « aux *zéolithes,* que les acides désagrégeraient com- « plètement tandis que les autres y résisteraient. Le « premier groupe, ajoute-t-on, céderait de préfé- « rence ses alcalis aux végétaux dans le cours de la « végétation. Mais cette distinction est arbitraire ; en « fait, il n'est pas possible de mettre d'un côté les « silicates attaquables, et d'un autre côté, les silicates « prétendus inattaquables. Cette distinction ne re- « présente guère que les degrés inégaux de la vitesse « de dissociation progressive des divers silicates con- « tenus dans les roches primitives, par les agents « atmosphériques ; la terre végétale n'étant qu'un « mélange de ces roches avec les produits de la dé- « composition propre des végétaux (1). »

Nous pourrions encore multiplier les exemples pour montrer l'insuffisance manifeste des méthodes analytiques. Même en ce qui concerne le dosage de la chaux (auquel M. BERTHELOT attribue une exactitude suffisante) des restrictions s'imposent. Il résulte, en effet, de nos propres expériences, que des sols granitiques, n'abandonnant aucune trace de cet élément aux réactifs acides, accusent cependant 0,0046 de chaux après décomposition des silicates complexes. Au reste, les cendres du lupin et du trèfle (récoltés sur ces terrains) contiennent toujours une proportion appréciable de composés calciques.

Dans notre second ouvrage consacré à la *Fertilisation du sol,* nous insisterons sur la valeur des données analytiques pour l'appréciation de la fertilité.

---

(1) *Chimie végétale,* t. IV, p. 29.

III

LES COMPOSANTS DU SOL

Le sable, l'argile, le calcaire et l'humus — qui sont les composants essentiels de la terre arable — offrent une constitution chimique très différente. Et s'ils influent à des degrés divers sur la fécondité du sol, les fonctions qu'ils remplissent sont loin d'être semblables. Considérés isolément, ces corps possèdent des *fonctions propres*. Pris dans leur ensemble, ils peuvent accuser, en plus, des *fonctions de relation* directes ou inverses. A quelque point de vue qu'on se place, les divergences apparaissent nettement, et elles sont imputables à la nature même des éléments.

On classe habituellement ces éléments en deux groupes : les *composants minéraux* et les *composants organiques*. Bien que cette distinction ait le mérite d'être à la fois simple et logique, elle a l'inconvénient de ne pas tenir suffisamment compte du rôle complexe des composés mécaniques ou physiques qui forment le squelette du sol. C'est pourquoi nous croyons devoir distinguer, en outre, pour chacune des classes, des *éléments originels* et des *éléments dérivés*.

J'appelle *éléments originels* ceux qui n'ont subi, au sein de la terre arable, aucune transformation apparente : ils ont conservé leur forme chimique primitive. Ce groupe comprend :

a) Dans l'ordre minéral : les *éléments quartzeux*,

feldspathiques ou *micacés* (encore parfaitement reconnaissables au microscope après décapage des agrégats terreux par l'acide oxalique), ainsi que les *minéraux accessoires*, inaltérables chimiquement, solubles ou non : talc, apatite, calcite, etc. ;

b) Dans l'ordre organique : les *résidus végétaux non humifiés*, qui ont conservé sensiblement leur structure anatomique propre, et qui peuvent être séparés sans difficulté, à l'aide d'un centrifugeur, si l'on a soin de les immerger dans une solution de nitrate de chaux à 40 pour 100 (densité 1,4).

J'appelle *éléments dérivés*, au contraire, ceux qui ont changé de forme sous l'influence des décompositions chimiques ou des actions biologiques diverses dont le sol est le siège. Nous pouvons rattacher à ce nouveau groupe :

a) Dans l'ordre minéral : les *éléments argileux*, le *calcaire non primitif*, les *sables siliceux* (formés aux dépens de la silice gélatineuse produite dans la décomposition des roches silicatées originelles), ainsi que tous les sels issus des actions chimiques régressives ou progressives, comme les *phosphates rétrogradés* et les composants minéraux des eaux.

b) Dans l'ordre organique : les *substances humiques* dérivées, ou plus exactement la *matière noire* que nos expériences nous permettent de considérer comme un mélange intime d'*humates* et d'*humophosphates* complexes formés surtout par voie humide ou par précipitation chimique.

Tous ces composants « mécaniques ou physiques », tous ces éléments siliceux, silicatés, calciques et organiques ne jouent pas un rôle égal au point de vue de la fertilité. Si les caractères physiques du sol procèdent de l'ensemble, nous devons admettre que les *éléments dérivés*, en raison de leur extrême ténuité, sont ceux qui interviennent le plus efficacement dans

la nutrition végétale. Par suite de leurs transformations antérieures — et à moins qu'ils aient subi anciennement des *actions métamorphiques* — les matériaux fertilisants y sont plus mobiles ou plus faciles à déplacer. J'ai démontré le fait expérimentalement, et l'on sait maintenant que la *potasse* de l'argile, que les *phosphates* qui l'accompagnent y sont toujours plus aisément mobilisables que dans les éléments feldspathiques et micacés originels, quel que soit leur degré de finesse. Quant aux composants de la *matière noire,* ils entrent progressivement dans la circulation : soit par l'action dissolvante des eaux, soit par l'action réductrice des innombrables ferments qui fourmillent dans la terre.

I. — Composants minéraux.

La partie inorganique du sol comprend les sables, l'argile et le calcaire. Le mot *sable* désigne ici des éléments de finesse variable, dépourvus de cohésion, c'est-à-dire incapables de faire pâte avec l'eau ou de s'agglutiner convenablement.

Au point de vue chimique, les éléments sableux sont constitués le plus souvent par un mélange de débris rocheux où l'on retrouve les diverses espèces minérales : *quartz, mica, feldspath,* etc. Il y aurait lieu, par conséquent, de considérer plusieurs variétés de sables. Sur ce point, nous préférons abandonner la classification ordinaire des composants minéraux et distinguer, d'après la constitution chimique :

1° les éléments siliceux ;
2° les éléments silicatés ;
3° les éléments calciques ;
4° les éléments accidentels.

Dans chaque groupe, nous rencontrerons des *éléments originels* et des *éléments dérivés*.

Éléments siliceux. — Les sols normaux contiennent toujours une certaine quantité de *silice libre*, cristallisée ou amorphe. Les débris de quartz, les *sables quartzeux* proprement dits, sont formés de silice cristallisée à peu près pure ; comme ils proviennent de la fragmentation des roches acides, ils représentent *l'élément siliceux originel*. A côté de ces sables primitifs, se placent les *éléments siliceux dérivés* qui ont pris naissance dans la décomposition chimique des minéraux silicatés (fig. 6). Nous savons, en effet,



Fig. 6. — A) *Sable quartzeux* originel ; B) *Silice précipitée* anhydre C) *Silice gélatineuse* hydratée. — Vus au microscope polarisant (grossis 80 fois) : les débris quartzeux présentent seuls des anneaux colorés.

que l'eau chargée d'acide carbonique, en réagissant sur les composés feldspathiques et ferromagnésiens,

libère toujours une quantité appréciable de silice à l'état *gélatineux* ou *amorphe.*

Ainsi, la dénomination « ÉLÉMENTS SILICEUX » s'applique indistinctement aux composants siliceux dérivés du quartz originel (qui n'existe pas dans toutes les roches) et des silicates primitifs. L'expression « ÉLÉMENTS QUARTZEUX » n'ayant pas la même extension de sens que la précédente ne doit pas être confondue avec elle. Les éléments siliceux dérivés ont une densité inférieure à celle du quartz ; ils sont moins résistants à l'action des alcalis, et on peut arriver à les séparer en traitant les sables, à chaud, par une solution de potasse ou de soude.

Bien que la silice libérée par action chimique soit plus facilement attaquable, et qu'elle puisse ainsi jouer un certain rôle dans la nutrition des plantes et dans les propriétés mêmes du sol, il faut considérer surtout les divers matériaux siliceux, suivant leur degré de finesse, comme des éléments de perméabilité, de division et de tassement.

Éléments silicatés. — Les sables feldspathiques et micacés, les débris rocheux et l'argile — qui correspondent chimiquement à des silicates plus ou moins complexes — appartiennent au groupe des *éléments silicatés* proprement dits.

Nature des éléments silicatés. — Il faut distinguer : les *éléments sableux* ou *originels,* qui peuvent affecter des formes et des dimensions très diverses, les *éléments limoneux* et les *éléments argileux* ou *dérivés,* qui se différencient nettement par l'ensemble de leurs caractères généraux. En effet, tandis que l'élément sableux (produit de fragmentation) présente une constitution chimique identique à celle des espèces minérales dont il provient, l'élément argileux (pro-

duit de décomposition) accuse toujours, au contraire, une moindre richesse en silice et en oxydes terreux ou alcalins. Quoique l'étude de ces composés soit encore fort incomplète — en raison des difficultés qu'on éprouve pour la séparation de l'argile — elle n'en présente pas moins, à tous égards, un intérêt des plus considérables.

1° Éléments sableux. — C'est dans le sable grossier et dans le sable fin, séparés par lévigation,

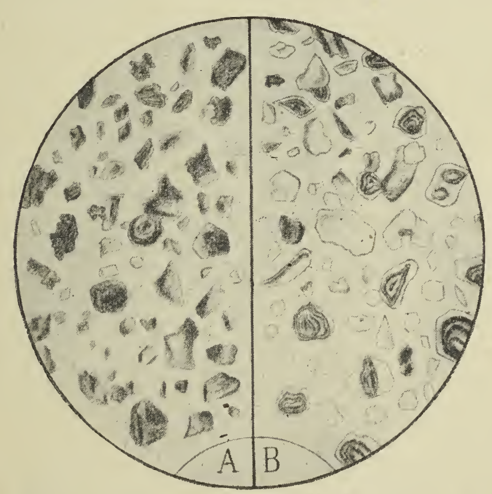


Fig. 7. — Mélange de sable grossier et de sable fin extrait d'un sol silico-argileux. A) *Sables bruts ;* B) *sables décapés* (gross. 110 au microscope polarisant).

qu'on retrouve, à l'analyse, la majeure partie des minéraux originels (fig. 7). Nous avons montré précédemment, en étudiant la constitution minéralogique du sol, comment on pouvait isoler les espèces essentielles qui s'y trouvent contenues. Il n'y a pas

lieu de revenir sur cette question. Toutefois, nous devons rappeler ici que le sable fin diffère considérablement du sable grossier, non seulement en raison de sa ténuité, mais aussi par son extrême pauvreté en mica et surtout en feldspath.

Au point de vue physique, le sable grossier est un *élément de perméabilité*, tandis que le sable fin, malgré son défaut de cohésion, doit être considéré comme un *élément de tassement*. Dans les sols sableux, où la formation des agrégats se trouve paralysée, par suite de l'insuffisante proportion des éléments d'agglutination, la perméabilité est en raison directe de l'abondance du sable grossier. Si le sable fin domine, la pénétration de l'eau devient très pénible : *la terre est essentiellement battante.*

Au point de vue chimique, les composés sableux offrent encore de sensibles différences. Et s'ils renferment également de l'*alumine*, de l'*oxyde de fer,* de la *magnésie*, de la *chaux* et de la *potasse*, il ne s'ensuit pas que ces matériaux y soient utilisables au même degré. Comme l'intensité des actions dégageantes est fonction de la finesse des particules — à conditions égales de milieu — il en résulte que le sable fin contribuera plus efficacement que le sable grossier à la nutrition des végétaux ou à la formation des réserves nutritives du sol.

2° Éléments limoneux. — Cette appellation s'applique au *sable impalpable*, au limon, dont les caractères physiques sont intermédiaires entre ceux du sable surfin et de l'argile. Abstraction faite du silicate d'alumine hydraté et de ses dérivés immédiats, les éléments limoneux du sol sont essentiellement constitués par un mélange d'espèces minérales très tenues, ayant déjà subi une hydratation assez profonde (sans décomposition chimique apparente)... Pour pouvoir rester en suspension dans l'eau au-dela

de vingt heures les éléments sableux, limoneux et argileux retiendraient, d'après nos recherches, les quantités d'eau suivantes (les déterminations d'humidité ayant été faites après séchage à l'air et à l'étuve) :

	POUR CENT PARTIES	
	Séchée à l'air.	Séchée à l'étuve.
Sable fin (après 6 heures)	19,6	20,4
Sable surfin (après 12 heures) . .	41,8	55,0
Sable surfin (après 18 heures) . .	42,6	58,0
Limon n° 1 (après 24 heures). . .	39,2	61,6
Limon n° 2 (après 30 heures). . .	37,0	62,9
Argile coagulée (après 2 jours) . .	25,6	72,0
Argile non coagulée (après 2 jours).	29,5	76,5

On voit combien diffèrent les divers degrés d'hydratation. Ce sont les éléments le plus fortement hydratés qui restent le plus longtemps en suspension. Le limon déposé après 30 heures contient 1,7 fois son poids d'eau ; l'argile coagulée après deux jours de repos, en accuse 72 parties, et celle qui reste en suspension pendant le même temps retient trois fois son poids. C'est donc la faculté d'hydratation, à la fois fonction de la ténuité et de la nature des éléments, qui règle le temps de dépôt des composants du limon et de la matière argileuse, Celle-ci possède des propriétés absorbantes notoirement supérieures, en raison de son origine même, et c'est cela qui la différencie. On pourrait dire que *le limon contient l'argile en puissance :* une décomposition chimique suffit, en effet, pour le changer de forme.

3° Éléments argileux. — En raison de son origine et de ses propriétés, nous devons considérer l'argile comme un *élément dérivé* provenant de la décompo-

sition des feldspaths, et non comme une poussière très ténue de la roche primitive.

Examinée au microscope, à de forts grossissements, cette substance n'est guère perceptible ; on pourrait même la considérer comme invisible si elle était dépourvue de sable très fin. Elle fixe les colorants avec une rare intensité, mais ceux-ci déterminent aussitôt sa coagulation, et les grumeaux ainsi formés sont indéfinissables.

Et d'abord qu'est-ce que l'argile ? Comment diffère-t-elle du sable fin ? En 1874, à la suite de ses intéressantes recherches sur la coagulation des limons (1), M. Th. Schlœsing publia un important travail sur la constitution des kaolins. En les agitant au sein de l'eau, il remarqua qu'il se produisait, pendant le tourbillonnement, des reflets de lumière dénotant la présence de paillettes cristallines. Dès lors, il admit l'existence de plusieurs variétés d'argiles : une *argile cristalline* — parfois très ténue, visible au microscope, se déposant habituellement assez vite et n'offrant qu'un degré de cohésion comparable à celui de toute poudre minérale de même finesse — et une *argile amorphe* ou *colloïdale*, invisible, essentiellement plastique, et pouvant rester indéfiniment en suspension dans un liquide dépourvu d'agents coagulateurs ou de substances capables de l'entraîner.

Quand on essaye de séparer les divers silicates d'alumine naturels, en les délayant dans une eau alcalinisée, de façon à les mettre en suspension, on observe que la liqueur trouble, après plusieurs jours de repos, se scinde en couches horizontales nettement superposées dont l'opacité va croissant de haut en bas. Des kaolins très homogènes n'offrant

---

(1) Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. LXX.

pas cette particularité, M. Schlœsing en conclut que ces couches correspondent à différents silicates qui viennent se classer suivant un ordre dépendant tout à la fois de la forme, des dimensions et du poids des particules.

Dans le sol, à l'état naturel, les variétés d'argile se trouvent mélangées en proportions diverses. En réalité, l'*argile cristalline* paraît être un sable d'une extrême finesse. Il n'y aurait donc, en somme, qu'une véritable argile : l'*argile colloïdale.*

Je montrerai plus tard, d'après les recherches que j'ai effectuées, les transformations que l'argile peut subir sous l'influence de certaines actions chimiques. A mon avis, la forme colloïdale n'est pas la seule à considérer; elle constitue un état spécial et temporaire. Pour le moment, il nous suffit d'admettre que *les éléments argileux peuvent revêtir une forme colloïdale ou non colloïdale, leur plasticité étant toujours modifiable suivant les circonstances de milieu.*

Composition des éléments silicatés. — La constitution chimique des composés silicatés, extraits du sol par la méthode analytique de M. Schlœsing, accuse des variations assez sensibles d'une terre à l'autre. Pour un sol donné, l'analyse décèle de grandes différences entre le sable fin, les écailles qui le recouvrent et l'argile brute. C'est ce qui ressort du tableau suivant que nous empruntons à M. Schlœsing (1) :

(1) Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. LXX.

ÉLÉMENTS DOSÉS	SABLE FIN	ÉCAILLES (1)	ARGILE
Silice	91,18	82,95	56,22
Alumine	5,88	9,36	21,70
Chaux.	0,10	»	2,25
Magnésie. . , ...	0,27	0,40	1,72
Potasse	1,00	2,10	3,36
Soude	0,62	0,70	0,29
Peroxyde de fer	0,94	3,62	11,72

Ces données sont particulièrement instructives ; elles montrent, en effet, que la proportion de silice décroît à mesure que l'action désagrégeante se poursuit, tandis que la richesse en oxydes augmente.

Dans la décomposition des roches — ainsi que nous l'avons établi — la quantité de silice décroît également, mais les alcalis diminuent avec elle ; ici, c'est le contraire qui se produit puisque les *écailles* et l'*argile* sont plus riches que le *sable fin* en alcalis, en oxyde de fer et en alumine. Cette anomalie singulière s'explique très bien si l'on fait entrer en ligne de compte le *pouvoir absorbant* des éléments argileux et colloïdaux, ainsi que la nature des combinaisons qu'ils contractent avec les composés humiques.

Au reste, cet accroissement de richesse n'est pas un fait isolé. En analysant les dépôts successifs obtenus avec des kaolins, on remarque généralement une augmentation sensible dans la proportion de potasse.

M. Schlœsing a trouvé pour un kaolin de la Manche :

(1) Le nom d'écailles s'applique au dépôt brunâtre qui se forme sur le sable fin et qui s'en détache par dessiccation.

ÉLÉMENTS DOSÉS	MATIÈRES DÉPOSÉES APRÈS		ARGILE EN SUSPENSION
	UN JOUR	27 JOURS	
Eau	13,93	12,70	10,30
Silice	46,55	48,57	49,57
Alumine	40,05	36,47	31,32
Oxyde ferrique	»	»	1,98
Magnésie	0,04	1,36	1,29
Potasse	0,04	1,03	4,25

Dans des études plus récentes (1), M. Schlœsing constate le même fait pour l'acide phosphorique et le sesquioxyde de fer. Si l'on délaye, par exemple, 500 grammes de terre fine dans deux litres d'eau azotique au millième et qu'on analyse l'argile colloïdale et les dépôts recueillis après un temps déterminé, on obtient pour un sol de Neauphle-le-Château (Seine-et-Oise) :

TEMPS	POIDS DES DÉPOTS	Sesquioxyde de fer		Acide phosphorique		Rapport $\frac{P^2O^5}{Fe^2O^3}$
		DOSÉ	°/o	DOSÉ	°/o	
	gram.	gram.		gram.		
10 secondes	18,92	0,141	0,75	0,00312	0,016	0,022
5 minutes	36,85	0,274	0,74	0,00776	0,021	0,028
1 heure	18,79	0,323	1,56	0,00614	0,034	0,022
5 heures	4,61	0,222	4,80	0,00634	0,0137	0,029
12 heures	2,12	0,153	7,19	0,00440	0,257	0,029
6 mois	7,55	0,743	9,80	0,01888	0,250	0,025
Argile colloïdale	2.78	0,287	10,30	0,00860	0,030	0,030

On remarquera la progression rapide des proportions

(1) Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. CXXXIV.

d'acide phosphorique et d'oxyde de fer à mesure que les lots sont composés d'éléments plus petits ; il semble que les deux substances soient à l'état d'enduits, enrobant les éléments du sol, et se trouvent naturellement en plus grande quantité à mesure que le degré de finesse augmente. De plus, les rapports diffèrent peu pour les lots d'une même terre, et il y a une certaine similitude entre les argiles colloïdales et les éléments hydratés très ténus qui les accompagnent.

Toutes ces considérations ont une importance capitale, mais elles s'appliquent surtout à des terres anciennes où le travail de désagrégation est déjà très avancé. Quand les débris rocheux non désagrégés abondent, comme dans certains sols granitiques, ce ne sont pas toujours les éléments fins qui offrent la plus grande richesse. Nous le prouverons ultérieurement.

Il convient de retenir, pour le moment, la constitution chimique très inégale des éléments silicatés, et en particulier celle de l'argile agricole... A ce propos, on remarquera combien nous sommes éloignés du silicate d'alumine hydraté qui, pour le géologue, représente l'argile essentiellement pure. De fait, les éléments argileux, tels qu'on les obtient par les méthodes courantes d'analyse, offrent une constitution extrêmement variable. Cela tient à plusieurs causes :

1° Aux impuretés qui accompagnent l'argile proprement dite ;

2° Aux modifications que cette argile subit constamment au sein même de la terre arable.

Pour ce qui est de la première cause, il n'y a pas lieu d'insister longuement. L'argile agricole représente un mélange d'éléments limoneux et d'éléments argileux. On y retrouve donc toutes les espèces minérales hydratées (voire même du quartz), en asso-

ciation avec les produits qui résultent de la kaolinisation.

Quant à la seconde cause elle a une influence moins sensible peut-être, mais plus constante et plus générale. On sait que sous l'action de l'eau chargée d'acide carbonique, le feldspath se décompose ou se kaolinise en donnant un silicate d'alumine hydraté ; mais, dans le sol, l'argile ne conserve pas sa pureté : en raison même des *propriétés absorbantes*, elle fixe certains corps qui modifient sa nature. C'est ainsi que les phosphates solubilisés, les carbonates et les humates alcalins, cèdent à l'argile de l'acide phosphorique, de la potasse, de l'humus et des oxydes de fer, qui lui donnent une constitution parfois bien différente de celle du kaolin.

Éléments calciques. — La chaux n'existe pas à l'état libre dans le sol, mais on y trouve des composés calciques divers : *calcaire, plâtre, phosphate* et *nitrate de calcium*. La plupart de ces corps se sont formés par voie chimique (sauf une partie du phosphate de chaux qui existait en faible proportion, à l'état d'*apatite*, dans les roches primitives).

1° **Carbonate de chaux.** — Tous les silicates complexes à base de chaux, sous l'influence lente de l'acide carbonique, ont abandonné cette base en formant du *calcaire* (CO^3Ca) que nous trouvons aujourd'hui, sous des états physiques très différents, dans les sols dérivés des terrains secondaires, notamment dans les étages du *jurassique* et du *crétacé*.

Le calcaire n'est pas également actif sous toutes ses formes C'est le *calcaire terreux* proprement dit — le carbonate de chaux précipité — qui joue le plus grand rôle. On sait comment ce corps a pris naissance : le calcaire, qui se dissout à la faveur du gaz

carbonique, engendre du *bicarbonate de chaux* qu'on rencontre dans les eaux du sol ; quand celles-ci se concentrent, une partie de l'acide carbonique se dégage, et du calcaire se sépare alors sous un état très pulvérulent : c'est le *calcaire précipité* ou *terreux.*

A côté de lui, nous trouvons, dans certaines terres, des calcaires grossiers, graveleux et pierreux, qui sont plus difficilement attaquables par les agents de solubilisation.

2° **Sulfate de chaux.** — Le *plâtre* ou *sulfate de chaux* (SO^4Ca) se rencontre dans beaucoup de sols, et particulièrement dans ceux du bassin parisien où les roches séléniteuses sont parfois très abondantes. Ce corps a surtout pour effet de mobiliser la potasse. Il est peu soluble dans l'eau qui en dissout seulement 3 à 4 grammes par litre.

3° **Nitrate de chaux.** — Le *nitrate de calcium* [$(AzO^3)^2Ca$] se forme par l'action de l'acide nitrique sur le carbonate de chaux ; il prend naissance surtout pendant la nitrification. C'est aussi un produit de double décomposition : le nitrate de soude incorporé au sol se dédouble, en présence du calcaire, pour former du nitrate de chaux. On le rencontre en assez faible proportion dans les eaux.

Éléments accidentels. — Outre les éléments qui viennent d'être signalés, certains sols contiennent des carbonates et des chlorures alcalins, du sulfure de fer, etc., qui les rendent parfois stériles.

Pour déceler la présence des chlorures alcalins, on épuise une certaine quantité de terre par l'eau bouillante ; la solution précipite par le nitrate d'argent en donnant un chlorure insoluble dans l'eau et les acides chlorhydrique ou azotique, mais très soluble dans l'ammoniaque.

La *pyrite* ou *sulfure de fer* (FeS) existe dans certains sols tourbeux ; elle s'oxyde à l'air et donne du *sulfate ferreux* (SO^4Fe) qui se transforme bientôt en *sulfate ferrique* [$(SO^4)^3Fe^2$] et en peroxyde de fer (Fe^2O^3) (1).

D'après Wœlcker (2) les terres provenant du dessèchement du lac de Harlem contenaient pour 100 :

Sulfate de fer	0,74
Sulfure de fer	0,71

Pour caractériser les sulfures, il suffit d'attaquer la terre par un acide minéral qui déplace aussitôt l'*hydrogene sulfuré* (H^2S) reconnaissable à son odeur nauséabonde et à son action sur un papier imprégné d'acétate de plomb (le papier noircit par suite de la production du sulfure de plomb). Pour déceler le sulfate de fer, on lessive la terre et l'on ajoute ensuite aux eaux de lavage quelques gouttes de prussiate rouge : il se forme un précipité ou une coloration bleue très sensible.

Les *sols alcalins* (terrains salants) existent surtout dans les régions chaudes de la Californie. MM. Hilgard et Loudrighe (3) les ont soigneusement étudiés. Après les pluies, à la suite d'une évaporation active, ces terrains se recouvrent d'efflorescences blanchâtres où l'analyse décèle un mélange de *sulfates* et de *carbonates alcalins*, associés à quelques sels terreux et alcalino-terreux.

II. — Composants organiques.

On groupe habituellement, sous le nom générique *d'humus* ou *terreau*, toutes les matières organiques

---

(1) On peut ainsi représenter symboliquement ces diverses réactions :

1°) $FeS + O^4 = SO^4Fe$

2°) $6(SO^4Fe) + O^3 = Fe^2O^3 + 2[(SO^4)^3Fe^2]$.

(2) *Journal de la S. R. d'Agr. d'Angleterre*, 1865.

(3) *Annales agronomique*, t. 22, p. 536.

du sol arable. A la vérité, il serait préférable de tenir compte de l'état de décomposition de ces substances et d'admettre, *a priori*, que la terre contient :

1° des débris végétaux intacts,
2° des débris végétaux en voie d'humification,
3° des matières humiques libres,
4° de la matière noire.

Les substances des premiers groupes représentent les éléments organiques *originels ;* la *matière noire*, au contraire, est un élément organique *dérivé*, puisque les composés humiques qu'elle renferme ont été préalablement solubilisés, puis précipités à l'état d'humates ou d'humophosphates divers.

Ne trouve-t-on pas, en effet, dans la terre, les termes de transition qui marquent le retour de la matière organisée au monde minéral ? Dès lors, pourquoi réunir sous une dénomination commune des composés organiques très dissemblables ? Entre *l'humus actif*, qui forme la *matière noire* du sol, et les débris végétaux originels, où le microscope décèle encore les traces de la structure cellulaire (fig. 8 et 9), il existe de telles différences qu'une distinction primordiale s'impose.

Matières organiques originelles. — Nous n'insisterons pas autrement sur la nature des débris végétaux proprement dits qui n'exercent qu'une action physique de division. Par contre, il est indispensable d'insister sur les matières humiques libres ou originelles, en ayant soin d'indiquer leur origine, leur constitution et leurs propriétés générales.

Origine de l'humus. — Les plantes qui meurent sur le sol, les débris végétaux qui se détachent des

tiges ou qui restent en terre après la récolte se décomposent lentement et donnent ainsi naissance à *l'humus brut* qui engendrera ultérieurement, si les conditions de milieu le permettent, une *matière noire* extrêmement active.

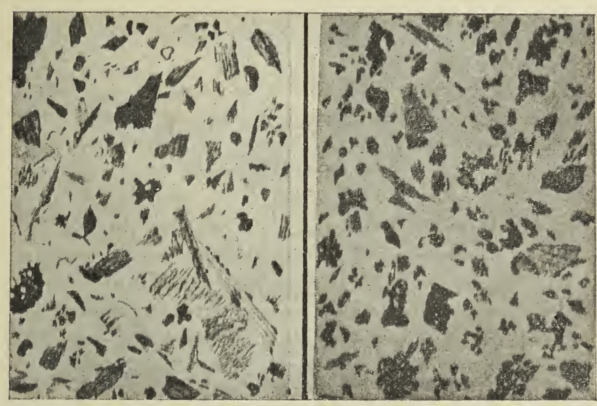


Fig. 8. — Matières organiques de la tourbe.

Fig. 9. — Matières organiques d'un sol cultivé.

Ces matières ont été séparées, par immersion, avec une solution concentrée de nitrate de chaux, puis enrobées dans de la paraffine. Les figures sont la reproduction d'une coupe vue au microscope à un faible grossissement. On aperçoit encore les trachées et les faisceaux vasculaires.

Par quel mécanisme, sous quelles influences les résidus de la végétation passent-ils à l'état de terreau ? Les transformations qu'ils subissent sont-elles toujours de même sens ? La nature du sol exerce-t-elle, enfin, une action décisive sur l'intensité du phénomène d'humification ?

Tout d'abord, il convient de remarquer que le processus de l'humification varie suivant la nature des milieux : dans un milieu aéré, où l'oxygène arrive facilement, l'humus se forme par voie d'*éré-*

macausis, c'est-à-dire par combustion lente ; à l'abri de l'air, au contraire, il se produit essentiellement par voie de *putréfaction*. Parfois les actions s'ajoutent ou se complètent, comme dans la fabrication du fumier, et les deux processus concourent alors simultanément à l'humification. Dans tous les cas, la décomposition des matières organiques naturelles se traduit par des pertes sensibles de carbone, d'hydrogène et d'oxygène.

M. Kostytcheff (1), qui étudia l'origine de l'humus des terres noires de Russie, a démontré expérimentalement que la décomposition des matières végétales donne lieu à un dégagement continu d'acide carbonique. Le poids des substances en putréfaction diminue ainsi progressivement, et comme les matières azotées persistent, il en résulte un enrichissement relatif en azote. Seul le rapport du carbone à l'azote décroît constamment, et ses variations progressives et continues témoignent de l'allure générale de l'humification.

Dans les milieux aérés, où l'*érémacausis* atteint le maximum d'intensité, les *ferments oxydants*, essentiellement aérobies, détruisent les composés hydrocarbonés : matières sucrées, gommes, amidon, etc...

Par contre, dans les sols imperméables, les matières végétales se putréfient sous l'influence des *ferments anaérobies* ou réducteurs : la cellulose subit alors la *fermentation forménique* qui est caractérisée par un dégagement de *méthane* ou *formène* et d'acide carbonique (2).

Toutefois, les ferments ne sont pas les seuls êtres

---

(1) *An. agronomique*, t. XVII, p. 17.

(2) La réaction probable serait la suivante :

$$\underbrace{C^6H^{10}O^5}_{\text{cellulose}} + \underbrace{H^2O}_{\text{eau}} = \underbrace{3\ CH^4}_{\text{méthane}} + \underbrace{3\ CO^2}_{\text{ac. carbon.}}$$

qui contribuent à la formation de l'humus : les champignons et les vers de terre peuvent y participer également.

D'après M. C. Koning, certains champignons hyphomycètes seraient de puissants agents de destruction des plantes mortes. Le *Trichoderma Koningi* interviendrait tout particulièrement dans la décomposition des feuilles du chêne, du hêtre et du pin ; l'azote seul des composés humiques paraît être assimilé par ce champignon. Le *Céphalosporia Koningi* n'existe pas sur les feuilles vivantes ou récemment détachées des arbres, mais son activité se manifeste par la suite : on se trouve en présence d'un champignon spécifique de l'humification, qui serait essentiellement un habitant du sol.

C'est Darwin qui signala le premier l'influence des lombrics sur la décomposition des matières organiques, et nous avons dit comment, dans la Guinée, la fertilité du sol se trouve parfois subordonnée à leur activité. Nous savons à présent que ces actions peuvent être considérables ou insignifiantes suivant la nature des milieux. E. Wolny (1) a montré que dans un sol riche en humus, soumis durant plusieurs mois au travail des vers, la production de l'acide carbonique augmentait sensiblement (de 3,08 à 8,04, et de 1,90 à 5,61 pour 1.000 volumes d'air recueilli dans chaque lot). De même, on constate un fort accroissement pour les matières minérales solubles dans l'eau et pour l'azote ammoniacal.

	POUR 100 DE TERRE SÈCHE	
Du 19 au 28 Novembre	avec vers.	sans vers.
Matières minérales solubles. .	0,1534	0,0336
Azote ammoniacal dosé. . .	0,0115	0,0049

(1) *Annales de la Science agronomique* (1898-99).

Ainsi, les débris végétaux, sous l'influence des sucs intestinaux, éprouvent de grandes modifications, en traversant le tube digestif des vers. M. Kostitcheff a donc écrit avec juste raison :

« Dans la nature, les matières organiques passent plusieurs fois à travers les organismes. Les matières rongées, déposées comme excréments, ne sont plus propres à la nourriture des animaux, des vers, mais les champignons et les bactéries s'y établissent et, dans peu de temps, toute trace de la structure des plantes qui lui ont donné naissance a complètement disparu. »

Et voilà comment des êtres vivants — d'une organisation rudimentaire — contribuent puissamment à la production de l'humus, à la dégradation des matières organiques végétales.

Constitution organique de l'humus. — Comme la plante qui l'engendre, l'humus renferme des *matières ternaires non azotées*, des *matières organiques azotées* et des *matières minérales* diverses.

Parmi les composés organiques : ulmine et humine; acides ulmique, humique, crénique, apocrénique (1), il en est qui se dissolvent facilement dans les réactifs alcalins, tandis que d'autres se gonflent mais ne se dissolvent pas. Ces différentes observations ont conduit

---

(1) M. Mulder appelle *ulmine* et *acide ulmique* les corps essentiels de l'humus brun qui se forme au début de la décomposition végétale ; *humine* et *acide humique*, les éléments constitutifs de l'humus noir, qui correspondent à un état plus avancé de l'érémacausis ; enfin, *acides crénique* et *apocrénique*, les acides provenant d'une oxydation encore plus complète des corps de l'humus noir.

Ces dénominations ne répondent pas à des substances chimiques bien définies et il est préférable, en attendant mieux, de séparer les matériaux organiques de l'humus d'après leur résistance plus ou moins grande de l'action des alcalis.

M. W. Detmer à partager les composants organiques de l'humus en deux groupes : les *acides humiques*, qui se dissolvent dans les alcalis et dans les carbonates alcalins en donnant des liquides fortement colorés — des dissolutions d'*humate*, constituant la partie véritablement active du terreau — et les *bases humiques* (ulmine et humine) qui résistent à toute action dissolvante jusqu'à ce que leur transformation soit plus complète ou plus avancée.

Pour établir convenablement la constitution des substances humiques, il faudrait pouvoir séparer d'abord, à l'aide de réactifs appropriés, les *matières ternaires* et les *matières azotées*. Malgré de nombreuses recherches, cette séparation n'est pas faite. On sait seulement que les matières azotées de l'humus, sous l'action des acides et des alcalis, dégagent toujours de l'ammoniaque, et qu'il se produit en même temps une solution dans laquelle se trouvent encore des matières azotées plus résistantes. J'ai étudié l'influence des carbonates alcalins et des citrates solubles, mais tous ces travaux ne fournissent guère que de vagues indications sur la nature même de l'humus (1).

1° Action des acides. — Sous l'action de l'acide chlorhydrique, en solutions plus ou moins étendues, les matières humiques naturelles dégagent de l'ammoniaque. D'après MM. Berthelot et André, « la proportion d'ammoniaque croît avec la dose d'acide « chlorhydrique employée à froid, à partir des doses « faibles de cet acide, et à mesure que ces doses deviennent plus considérables et l'acide lui-même « plus concentré. Pour une même dose d'acide, la

(1) Voir ma brochure : *Les Matières humiques du sol*, éditée par M. Amat.

« quantité d'ammoniaque croît avec la température « et la durée du temps de contact. »

Nous avons étudié tout récemment, M. Deslandes et moi, l'action de l'acide oxalique faible (à 2 et 5 pour 100) sur les matières humiques du sol végétal. En opérant sur l'acide humique et sur l'humate de chaux (préparés par précipitation) on a trouvé les résultats suivants :

1° **Acide humique.** — Sur un gramme dosant 30 milligr. 06 d'azote total, dont 28 milligrammes d'azote organique :

	AZOTE SOLUBLE DOSÉ (en milligrammes.)	
	Azote ammoniac.	Azote organique.
Traitement par l'eau pure . . .	1,84	2,80
Traitement par l'acide oxalique		
à 2 pour 100	1,98	5,36
à 5 pour 100	2,16	5,71

Dans la matière traitée, la proportion d'azote déplaçable par la magnésie (que nous supposons être de l'azote ammoniacal) s'élevait à 2 mgr. 06, il n'y a donc pas eu, à vrai dire, production d'ammoniaque. Par contre, on voit que l'acide oxalique provoque une augmentation assez sensible de l'azote dissous.

2° **Humate de chaux.** — Sur un gramme dosant 32 mgr. 40 d'azote total, dont 31 mgr. 23 d'azote organique :

	AZOTE SOLUBLE DOSÉ (en milligrammes.)	
	Azote ammoniac.	Azote organique.
Traitement par l'acide oxalique		
à 2 pour 100	1,41	3,82
à 5 pour 100	1,95	3,73

La proportion d'azote ammoniacal (qui s'élevait à 1 mgr. 17 dans la matière traitée) n'est pas sensiblement accrue. En ce qui concerne la quantité d'azote soluble, elle paraît plus faible que pour l'acide humique soumis au même traitement.

Il résulte de ces observations que l'acide humique précipité et les combinaisons salines qu'il forme, surtout lorsqu'elles sont peu solubles dans l'eau, résistent assez énergiquement à l'action des acides étendus.

2° Action des alcalis. — Les alcalis ne provoquent pas seulement une transformation partielle de l'azote organique en azote ammoniacal, ils dissolvent aussi une forte proportion de matières humiques et nous renseignent très utilement sur la résistance de l'azote contenu dans l'humus, dont le partage se fait ainsi :

1° *Azote volatilisé* à l'état ammoniacal pendant le traitement ;

2° *Azote solubilisé* précipitable ou non précipitable par les acides ;

3° *Azote insoluble* dans les alcalis.

MM. Berthelot et André, dans leurs intéressantes recherches sur les terres et terreaux de Meudon, ont établi la répartition de l'azote de la manière suivante :

	Pour 100 de l'azote total
Azote volatilisé (ammoniacal) . . .	21,80
Azote insoluble (du résidu)	14,26
Azote soluble (non précipitable) . .	44,26
Azote soluble (précipitable)	16,46

En analysant le carbone et l'azote des matières humiques solubles et insolubles dans les alcalis, ils ont trouvé respectivement :

	HUMUS INSOLUBLE	HUMUS SOLUBLE	
		précipitable.	non précipitable.
Carbone. . . .	31,70	27,60	40,70
Azote	1,25	1,52	3,90
Rapport : $\frac{\text{carbone.}}{\text{azote}}$	25,36	18,15	10,44

On voit de suite que le rapport du carbone à l'azote diffère considérablement ; il est d'autant plus faible que l'état de décomposition des matières est lui-même plus avancé. Les composés humiques solubles dans les alcalis sont plus riches en azote, et parmi eux, c'est la fraction non précipitable par les acides qui tient de beaucoup la première place (1).

Dans les expériences que j'ai effectuées sur les sols tourbeux, je suis arrivé à des conclusions semblables. En établissant le rapport de l'azote volatilisé et de l'azote solubilisé, pour différentes terres traitées par la potasse étendue, j'ai trouvé des nombres variant dans les limites de 1 à 2 et de 1 à 4. On aurait, par exemple, en moyenne :

	Rapport : $\frac{\text{Azote volatilisé.}}{\text{Azote solubilisé.}}$
Sols normaux	0,360
Sols tourbeux	0,125

Il convient de remarquer que, pour la tourbe, le rapport est environ trois fois plus petit que dans les sols normaux. Il s'ensuit que l'azote se trouve surtout à l'état d'*alcalamides fixes* dans l'humus des sols tourbeux.

Ces essais nous montrent encore que le rapport

(1) Les intéressants travaux de MM. Berthelot et André sont consignés dans le tome II du *Traité de Chimie végétale et agricole.*

de l'azote non précipitable à l'azote dissous présente des différences énormes. Relativement faible dans les sols tourbeux réfractaires à la nitrification, il s'élève à plus de 50 pour 100 dans les terres ordinaires. Si l'on admet — ce qui est vrai d'ailleurs, ainsi que je l'ai reconnu expérimentalement — que la matière azotée non précipitable présente une forme plus simple et nitrifie plus rapidement que l'acide humique naturel, on s'explique pourquoi l'humus de tourbe se montre plus résistant à la nitrification.

Nous avons effectué de semblables recherches sur des solutions d'humates obtenues en traitant une terre humifère par la potasse, les carbonates alcalins et les citrates solubles. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

RÉACTIFS EMPLOYÉS EN SOLUTION NORMALE	LES SUBSTANCES HUMIQUES DISSOUTES CONTENAIENT °/o		RAPPORT DU CARBONE A L'AZOTE
	CARBONE	AZOTE	
Potasse caustique	54,3	6,00	9,05
Carbonate de potasse . .	52,4	6,08	8,60
Citrate de potasse. . . .	50,8	6,62	9,25
Citrate de magnésie . . .	46,6	7,28	6,40

On voit que la richesse en azote varie sensiblement. Toutefois, avec la potasse libre ou carbonatée, nous dissolvons à la fois de l'humus libre et de l'humus combiné, ce qui n'a vraisemblablement pas lieu au même degré par l'emploi des citrates solubles. Ces considérations nouvelles fournissent une explication suffisante pour comprendre la cause des différences précédemment observées.

Il nous a paru intéressant, d'autre part, d'étudier la résistance des diverses matières azotées de l'humus. Au lieu d'employer la potasse caustique, nous avons eu recours à la chaux, à la magnésie, au calcaire, au carbonate de potasse et à l'acide chlorhydrique. Les expériences ont été effectuées sur l'humus d'une terre tourbeuse de la Gironde, dont 100 grammes furent traités, à chaud, par une solution contenant 25 grammes de carbonate de potasse ; après filtration et lavage, on précipita l'acide humique par un léger excès d'acide sulfurique. Le résidu terreux insoluble, l'acide humique et le liquide contenant la fraction d'humus non précipitable furent successivement distillés ensuite, pendant six heures, avec 500 centimètres cubes d'eau, en présence de la chaux, de la magnésie, etc. On dosa l'azote ammoniacal dans les produits de la distillation.

RÉACTIFS EMPLOYÉS	AZOTE AMMONIACAL OBTENU	
	PENDANT LA DISTILLATION	°/₀ DE L'AZOTE INITIAL
	milligr.	
Chaux (o gr. 56)	26,78	41,92
Magnésie (o gr. 40	26,80	41,93
Carbonate de chaux (1 gr.) . . .	18,20	28,48
Carbonate de potassium (1 gr. 38) .	14,00	22,03
Acide chlorhydrique (o gr. 37 . .	23,76	37,18

Il est à remarquer que la chaux et la magnésie agissent dans le même sens ; elles ont mobilisé plus des deux cinquièmes de l'azote contenu dans le liquide non précipitable. L'action des alcalis a été moindre.

Le précipité d'acide humique, après avoir été séché à l'air et pulvérisé, fut soumis au même traitement ; il se montra bien plus résistant à l'action des réactifs. Ainsi la fraction d'azote déplacé par la chaux s'élève seulement à 13,7 pour 100 de la quantité initiale, tandis qu'elle atteint 17,9 avec la potasse.

Le résidu terreux insoluble dans le carbonate de potasse contenait encore une forte proportion d'humus avec 1,52 pour 100 d'azote. Distillé pendant six heures en présence des alcalis, il laissa dégager un peu d'azote ammoniacal (5,8 pour 100). Par contre, la chaux et la magnésie n'agirent pas de façon très sensible.

Tous les essais que nous venons de relater prouvent combien est inégale la résistance des matières azotées de l'humus. Ils nous autorisent donc à supposer que les composés humiques du sol contiennent de l'azote organique sous différents états : *protéïque*, *alcalamidé* et *amidé*, et l'on comprend, dès lors, qu'on puisse y retrouver, à côté de la molécule complexe des albuminoïdes, tous les produits intermédiaires résultant d'une décomposition plus ou moins avancée.

En somme, l'humus n'est pas et ne peut pas être une substance de composition définie ; il représente un mélange de composés organiques en voie d'altération ou de transformation.

Constitution minérale de l'humus. — On sait que les végétaux contiennent toujours une proportion appréciable (4 à 8 pour 100 de leur poids sec) de matières minérales diverses. Au cours de l'humification, une partie des composés hydrocarbonés disparaît, mais le résidu minéral plus ou moins modifié reste incorporé à la masse, et il se retrouve presque intégralement dans l'humus ainsi que Th. de Saus-

SURE l'avait déjà constaté (1). En quelle proportion et sous quelle forme les éléments inorganiques existent-ils dans le terreau ? D'après M. BERTHELOT, *cent parties* d'acide humique naturel extrait d'un sol de Meudon ont donné 3gr,47 de cendres dosant (en grammes) :

	POUR CENT PARTIES	
	d'humus.	de cendres.
Silice (SiO^2)	0,49	14,12
Acide phosphorique (P^2O^5)	0,29	8,35
Chaux (CaO)	0,05	1,44
Potasse (K^2O)	1,05	30,26
Oxyde ferrique (Fe^2O^3)	0,54	15,57
Alumine (Al^2O^3)	1,05	30,26

Il convient de remarquer les fortes proportions de potasse et de sesquioxyde de fer et d'aluminium. Tandis que les cendres végétales contiennent seulement *quelques centièmes* d'alumine et de fer, nous en trouvons plus de 40 pour 100 dans les cendres d'humus. Cette remarque n'est pas sans intérêt : elle nous montre que tous les composants minéraux de l'acide humique ne proviennent pas exclusivement des détritus végétaux, et qu'il doit se produire une migration de certains éléments terreux vers l'humus (2).

Au reste, la composition des cendres d'humus et de matière noire varie, non seulement avec l'état de décomposition des substances humiques, mais aussi avec la nature et l'activité chimique du sol. M. HIL-

(1) *Recherches chimiques sur la végétation.*

(2) Nos travaux sur la synthèse de la *matière noire* du sol nous permettront d'interpréter ce fait scientifiquement. (Voir plus loin *La Chimie du sol.*)

GARD a reconnu que la proportion d'acide phosphorique associé à l'humus représente 10 à 50 pour 100 de la quantité totale contenue dans la terre. M. Harry SYNDER cite également le cas d'une riche prairie où 1800 kilos d'acide phosphorique et 1200 de potasse — par hectare de sol végétal — se trouvaient combinés à l'humus. Le quart environ de la matière organique était à l'état d'humates, et ceux-ci contenaient environ 7,5 de potasse et 12,17 pour 100 d'acide phosphorique.

Cette association des éléments humiques et minéraux — dont je me réserve d'expliquer le mécanisme — est bien la cause déterminante de la fertilité des terrains au point de vue chimique. Pour le moment, il importe surtout de retenir : *que l'humus renferme une proportion notable de matières minérales diverses.* Et nous ajouterons : « *qui sont associées ou combinées avec lui* ». De fait, comme l'avait entrevu Th. DE SAUSSURE, les réactifs ordinaires ne permettent pas de caractériser les éléments inorganiques du terreau normal. Il faut détruire préalablement la matière organique. M. L. GRANDEAU relate le fait en ces termes : « La solution de *matière noire,* « dit-il, ne donne aucun précipité avec les réactifs « de l'acide phosphorique, de la chaux, du fer, de « l'alumine, de la magnésie et de la silice... A la « faveur de la combinaison organique dans laquelle « ils sont engagés, ces éléments ont perdu leurs pro-« priétés à l'aide desquelles nous constatons d'ordi-« naire leur présence dans les matières d'origine « minérale (1). »

Ainsi, pour déceler les principes fertilisants inorganiques de l'humus, il faut d'abord préparer les

(1) *Annales de la station agronomique de l'Est* (1877).

cendres et les traiter ensuite par l'acide azotique qui les dissout incomplètement : la partie soluble contient les phosphates de fer, de manganèse, de chaux, de magnésie et de potassse ; le résidu inattaqué, qui conserve encore une couleur rouge, est décomposé par l'acide sulfurique en silice, sulfate de chaux et oxyde de fer.

Matières humiques dérivées. — Sous le nom de *composés humiques dérivés*, nous groupons indistinctement les *humates* et les *humophosphates* naturels dont le mélange intime constitue la « *matière noire* » du sol. Ici, l'humus revêt une forme active : il a été préalablement solubilisé par l'eau pure ou chargée de carbonates alcalins, puis précipité ou insolubilisé de nouveau sous l'influence des composés calciques, alumineux ou ferriques et des phosphates dissous. A cet état, les substances humiques offrent une composition et des propriétés bien différentes de celles qu'elles possèdent sous la forme originelle, toute trace de structure cellulaire ayant complètement disparu (fig. 10 et 11).

On conçoit parfaitement, du reste, que la constitution chimique de la *matière noire* varie d'un sol à l'autre suivant la proportion et la nature des corps qui participent à sa formation.

Dosage de la matière noire. — Pour extraire la matière noire du sol et déterminer ainsi la proportion des composés humiques dérivés, M. L. Grandeau recommande de traiter par l'acide chlorhydrique étendu un poids connu de terre fine et sèche (10 ou 20 gr.). L'acide décompose le calcaire et les humates en formant, avec les bases, des chlorures solubles qu'on sépare aisément par filtration et lavage. On met ensuite le résidu en digestion dans l'eau ammoniacale (à 35 pour 100) pendant 24 heures, en ayant soin d'ajouter un peu de carbonate d'ammo-

niaque et d'agiter de temps en temps au début. Après repos, on décante le liquide noir et on recommence l'épuisement jusqu'à ce que la solution soit incolore. Les liquides sont évaporés à sec ; le résidu est pesé avant et après incinération : la différence de poids correspond à la partie organique de la matière noire.

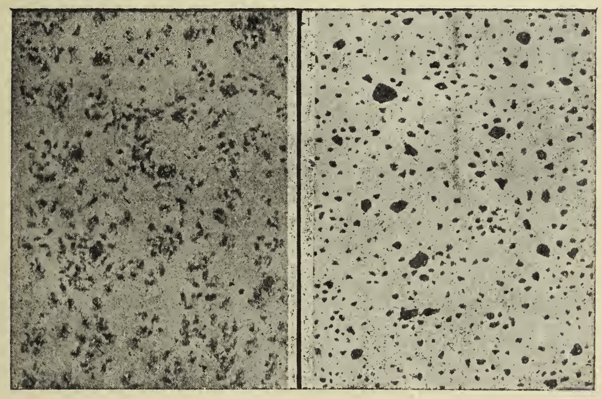


Fig. 10. — Humate de chaux. | Fig. 11 — Humophosphate.

Ce procédé de dosage donne des résultats approximatifs : l'ammoniaque, en effet, peut attaquer l'acide humique libre et dissoudre des composés n'appartenant pas aux substances organiques dérivées. Présentement, il n'est pas possible de mieux faire.

L'analyse chimique montre que la proportion de matière noire varie d'un sol à l'autre, suivant que les facultés absorbantes de l'humus sont plus ou moins satisfaites. Dans ses intéressantes recherches, M. Grandeau fait nettement ressortir ces variations :

	Cent parties des différentes terres donnent :		
	Matières combustibles.	Matière noire totale.	Cendres de la mat. noire.
Terre de Russie . . .	7,10	4,20	2,16
Terre de Serres . . .	11,00	0,94	0,12
Tourbe de Champigneule	35,99	1,00	0,02
Sol du grès vosgien . .	1,32	0,11	0,08
Terreau	46,40	4,27	0,07

En rapportant les cendres à 100 parties de *matière noire,* on obtiendrait respectivement :

Pour la terre de Russie	51,4
Pour la terre de Serres	12,8
Pour la tourbe de Champigneule . . .	2,0

Bien que toutes ces cendres renferment qualitativement et à peu de chose près les mêmes substances, il ne s'ensuit pas que celles-ci s'y rencontrent en proportions comparables. Avec les terres de Russie et de Serres, on trouve par exemple :

	Pour 100 de cendres de la matière noire	
	Acide phosphorique.	Acide silicique.
Terre de Russie . . .	17,50	6,3
Terre de Serres. . . .	6,91	33,3

En résumé, il ressort manifestement de toutes ces données analytiques : *que si les composés humiques dérivés offrent souvent de remarquables analogies au point de vue qualitatif, ils n'en accusent pas moins*

de très sensibles différences sous le rapport de leur constitution quantitative. C'est ce point essentiel que nous voulions surtout bien mettre en évidence (1).

(1) Nous avons omis, à dessein, de mentionner en détail la production de la ***matière noire.*** Cette intéressante question sera développée au chapitre relatif à la ***chimie du sol.*** Pour éviter des répétitions inutiles, nous avons limité notre étude à la constitution chimique des composants essentiels de la terre arable. Les propriétés et le rôle prépondérant de ces corps apparaîtront plus nettement dans la suite.

IV

LES PROPRIÉTÉS DU SOL

Pour que les plantes croissent normalement dans le sol qui les supporte, il faut que celui-ci soit *meuble, stable, continu* et suffisamment *riche*. Toutes les fois que ces conditions se trouvent réalisées, les qualités du terrain sont parfaites : elles assurent, en effet, la fixité des racines, le bon développement des récoltes et la libre circulation de l'air et de l'eau. Mais la plupart de nos terres, malheureusement, ne réalisent pas toutes ces propriétés ; elles offrent une constitution physico-chimique très différente, et parfois très défectueuse, dont il faut s'efforcer de corriger les défauts. Comment pourrions-nous opérer ces corrections si nous ignorions les caractères propres à chaque nature de terrain ? Les amendements et les engrais permettent d'améliorer avantageusement la terre arable, mais l'emploi judicieux des matières fertilisantes — j'allais écrire les *agents correcteurs* — repose en partie sur la connaissance des propriétés du sol. Et cela seul justifierait au besoin l'utilité de l'étude que nous allons entreprendre.

Quel que soit le point de vue envisagé, les qualités fertilisantes d'une terre donnée dépendent de ses proprtétés générales qui ne reflètent parfois que celles des composés dominants, comme pour les *sols simples :* argileux, siliceux, calcaires ou humiques. Dans les sols composés, au contraire, les caractères

des éléments s'ajoutent ou se compensent, et les propriétés du mélange deviennent alors la résultante de celles des matériaux constitutifs. Qu'il s'agisse des *fonctions propres*, inhérentes à la nature même des composants, ou des *fonctions de relation* résultant de leur association commune, l'étude des qualités de nos terrains n'en présente pas moins d'intérêt. C'est pourquoi nous décrirons successivement les *propriétés physico-chimiques* du sol arable.

A la rigueur, étant donné que les ferments réalisent surtout des transformations chimiques, on pourrait rattacher les propriétés biologiques aux propriétés chimiques, mais les premières ont pris une telle importance, depuis les grandes découvertes de PASTEUR, qu'il nous semble préférable de les étudier séparément.

I. — Propriétés physiques.

La pratique des façons culturales ayant pour objet d'ameublir le sol conduisit naturellement les premiers agriculteurs à distinguer les *terres fortes*, compactes et froides, d'un travail pénible, et les *terres légères*, meubles et friables, où les instruments ont facilement accès. Déterminer les conditions qui assurent l'ameublissement du sol, la pénétration des agents atmosphériques : voilà l'objet de nos présentes recherches. Et comme les travaux culturaux deviennent aisés ou difficiles, suivant que les terres sont lourdes ou légères, tenaces ou sans cohésion, nous avons besoin de connaître d'abord la *densité*, la *ténacité* et la *porosité*. D'autre part, puisque le sol retient plus ou moins de chaleur, ce qui fait que les récoltes y sont précoces ou tardives ; puisqu'il se

montre inégalement perméable à l'air et à l'eau, il convient aussi d'examiner ses relations avec les agents extérieurs. Ainsi, les *propriétés physiques* se partagent en deux groupes, suivant que l'on considère le sol en lui-même (*propriétés intrinsèques*) ou dans ses rapports avec l'air, l'eau et la chaleur (*propriétés extrinsèques*).

Aussi longtemps qu'on s'est borné à l'étude des proprietés intrinsèques — abstraction faite de la texture du sol — et à la détermination des coefficients d'imbibition, d'hygroscopicité et d'évaporation, l'importance des caractères physiques ne ressortait pas de façon bien manifeste. On en était même arrivé au point de ne les mentionner que pour mémoire dans certains ouvrages agricoles. Les intéressantes recherches de WOLNY, de KING, de WHITNEY et de HALL — qui ont sans doute inspiré l'excellente brochure de M. GAROLA (1) — celles de P.-P. DEHÉRAIN sur le travail du sol (2), ont considérablement élargi le cercle de nos idées. En tout cas, elles laissent déjà bien loin les anciens travaux de SCHUBLER, de MASURE et de GASPARIN.

La plupart des propriétés des terres en place sont dominées par la *texture du sol*. Toute modification apportée à cette texture se traduit, en effet, par de sensibles variations dans les caractères physiques.

a) Des propriétés intrinsèques. — Il y aurait lieu d'étudier ici tout ce qui peut intéresser le sol considéré en lui-même : texture, profondeur, couleur, poids spécifique, etc. — La *profondeur* de la couche

---

(1) C.-V. GAROLA : *Contribution à l'étude phy·ique des sols* (1903).

(2) P.-P. DEHÉRAIN : *Traité de chimie agricole*, deuxième édition (1902), p. 402 à 433.

arable varie de quelques centimètres à plus d'un mètre. Jointe à la position du terrain, elle devra guider le cultivateur dans le choix des plantes et des méthodes culturales. — Les diverses colorations des sols — qui favorisent plus ou moins l'absorption de la chaleur — sont dues surtout aux combinaisons du fer (sols verdâtres, jaunâtres, rouges et ocreux), aux substances humiques (sols bruns et noirs) et à l'abondance du calcaire (sols blancs et gris). Cela dit, nous étudierons plus spécialement la *texture*, la *densité* et la *cohésion*.

Texture du sol. — Du fait que la terre arable présente une *structure granuleuse* — seule compatible avec l'existence de la *perméabilité* — elle renferme nécessairement des cavités, des pores, des vides plus ou moins nombreux qui constituent l'*espace lacunaire* dont le volume, pour un sol donné, dépend à la fois des agglomérats terreux et de la dimension des particules élémentaires. Il est bien évident qu'en l'absence même de tout agrégat, il n'en existerait pas moins des interstices entre les grains d'argile, de sable, etc. Avant d'étudier ces différents espaces, je crois devoir insister sur les caractères physiques des particules du sol.

Les particules terreuses (1). — Depuis une dizaine d'années, plusieurs agronomes étrangers — ceux surtout qui font usage de la *méthode hydraulique* d'analyse physique — se sont préoccupés à juste titre de mesurer les dimensions des sables, des limons

(1) Il ne faut pas confondre les particules terreuses avec les agrégats terreux. Tandis que ceux-ci ont la propriété de s'effriter (parce qu'ils sont un assemblage de particules) les autres restent intactes quand on les délaye dans l'eau ou que l'on essaye de les écraser sous la pression des doigts.

et de l'argile brute. Ces déterminations leur ont permis de calculer la vitesse des courants d'eau pour l'entraînement des particules, ainsi que la surface et le nombre des grains par unité de poids et de volume. Pour n'avoir pas à revenir sur cette question, j'ai groupé toutes les données utiles dans le tableau suivant :

NATURE DES CORPS	DIAMÈTRE DES GRAINS (en millimètres)		SURFACE DES GRAINS (par gr., en déc. carrés)	
	MAXIMA	MINIMA	MAXIMA	MINIMA
Sable grossier . . .	1,000	0,200	1,132	0,226
Sable moyen	0,200	0,050	4,528	1,132
Limon calcaire. . .	0,050	0,005	»	»
Limon silicieux . .	0,050	0,025	9,056	4,528
Limon surfin . . .	0,025	0,005	45,280	9,056
Argile brute . . .	0,005	0,001	226,400	45,280
Argile colloïdale . .	0,001	invisible	»	226,400

Le nombre de grains par gramme s'élèverait approximativement à 5.000 pour le gros limon, à 35 millions pour le limon moyen, à 50 milliards pour l'argile brute (diamètre 0,005) et à plus de 60 trillions pour l'argile colloïdale supposée visible. Ces observations présentent, à divers titres, un intérêt considérable. Nous en tirerons, dans la suite, d'importantes déductions pour l'interprétation de la fertilité et de la chimie du sol.

Les espaces lacunaires. — Le volume de ces espaces, occupé par de l'air ou de l'eau, est sujet à de grandes variations qui dépendent à la fois de la dimension, de la forme et de l'arrangement des particules et des agrégats terreux.

Supposons le cas d'agrégats égaux et sphériques, on peut prévoir deux sortes de groupements réguliers :

1° *L'arrangement des agrégats est tel que tous les plans tangents aux points de contact sont perpendiculaires ou rectangulaires entre eux.* Ce dispositif représente la *structure cubique* (fig. 12). Le calcul montre

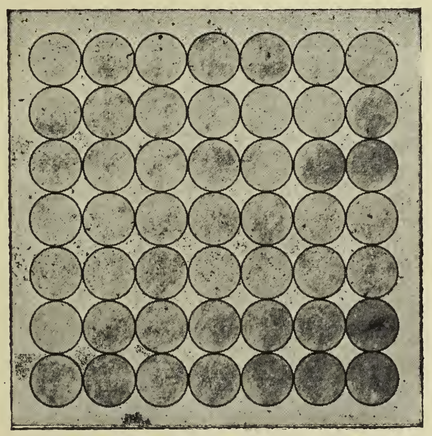


Fig. 12. — Type de structure cubique,

que l'espace lacunaire est maximum et qu'il atteint 47,74 pour 100 du volume total, quel que soit le diamètre des sphères, mais à condition que celles-ci aient toujours les mêmes dimensions.

2° *L'arrangement des agrégats est tel que chacun d'eux vient se loger dans l'espace laissé libre par les sphères voisines.* On se trouve alors en présence de la *structure pyramidale* (fig. 13), qui est plus compacte. L'espace lacunaire ne s'élève, en effet, qu'à 25,95 pour 100 du volume total.

Avec des particules et des agrégats de dimensions très inégales, le volume des pores serait bien différent. C'est ainsi que dans le sol, où les agrégats terreux ne sont ni sphériques, ni d'égal volume, l'espace lacunaire varie de 20 à 60 pour 100. A quelles causes faut-il attribuer ces variations ? Il semble qu'il y ait plusieurs facteurs déterminants : la *structure* plus

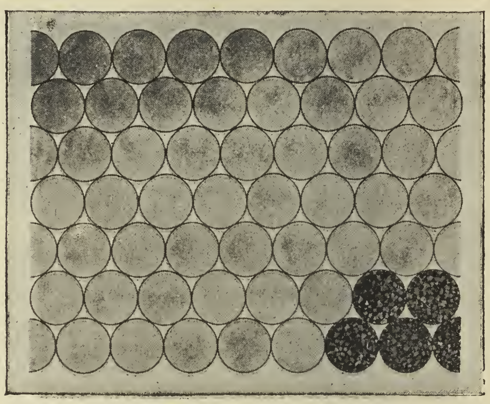


Fig. 13. — Structure dite pyramidale. En bas et à droite, on voit la disposition des particules élémentaires à l'intérieur d'un agrégat terreux.

complexe des molécules terreuses et leur degré de *tassement*.

Examinons d'abord la première cause.

Voici des agrégats terreux (fig. 13). Chacun de ces agrégats est formé d'un noyau central, entouré d'un enduit de revêtement, contenant surtout des grains sableux impurs qui laissent entre eux des vides plus ou moins considérables. Quand l'agglomération s'est produite, les grains ont emprisonné de l'air et de l'eau. Il suit de là que l'espace libre du sol comprend toujours : un *espace lacunaire intergranuleux* (espace

lacunaire existant entre les agglomérats) et un *espace lacunaire intragranuleux* (espace lacunaire compris entre les particules élémentaires des agglomérats).

Pour mesurer approximativement l'*espace lacunaire*, dans les sols en place, il suffit de prélever un volume connu de terre et d'en déterminer le poids avant et après dessiccation. La différence entre le *volume apparent* ou primitif (V_a) et le *volume réel* (V_r) de la matière sèche — obtenu en divisant le poids de la terre desséchée par la densité absolue du sol qu'on suppose égale à 2,6 — donne l'espace vide :

$$E_v = V_a - V_r = V_a - \frac{p}{2,6}$$

On effectue les prélèvements de terre à l'aide de cadres métalliques à parois tranchantes (*méthode des cadres* de P.-P. Déhérain), ou bien, comme le fait M. Garola, avec une sonde cylindrique bien calibrée (ayant un diamètre de 0,05) et divisée en centimètres dans le sens de la longueur. Si l'on veut connaître le volume approximatif de l'air et de l'eau contenus dans l'*espace lacunaire*, il suffit de transformer les poids en volumes et d'appliquer les formules connues (1).

En général, le volume des espaces lacunaires peut varier sensiblement d'un sol à l'autre, et aussi d'un

---

(1) Soient le poids de l'échantillon recueilli, p, x et v les poids respectifs de la terre sèche, de l'eau et de l'air, on aura : Ⓟ $= p + x + y$ (*équation des poids*). De même, en représentant par Ⓥ, v, v', v'', les volumes correspondants, on peut écrire : Ⓥ $= v + v' + v''$... Et comme les volumes représentent le quotient du poids par la densité, cette dernière équation peut se mettre sous la forme suivante :

$$V = \frac{p}{2,6} + \frac{x}{1} + \frac{y}{1,293},$$

d'où l'on tire les valeurs respectives de x et de y.

moment à l'autre pour un même terrain Ces variations sont imputables à plusieurs causes ; elles se groupent en deux séries : les unes se rapportent aux *espaces lacunaires intergranuleux*, les autres aux *espaces lacunaires intragranuleux*. Les premières sont sous la dépendance de la dimension et de la forme des agrégats, ainsi que des actions capables de les rapprocher ou de les détruire (tassement); les secondes, au contraire, dépendent presque exclusivement des modes d'agglutination des particules terreuses.

D'une part, en raison de la ténuité des matières argileuses et colloïdales, dont les particules peuvent se glisser dans les interstices, l'espace libre diminue parfois de façon très sensible, surtout quand les agglomérats sont momentanément et partiellement démolis. L'action du *tassement* est des plus manifestes. Dans un sol roulé ou non travaillé, le volume de ces espaces sera toujours plus faible. Les pluies copieuses, qui désagrègent les particules superficielles, tassent naturellement le sol et restreignent ainsi l'espace lacunaire. Par contre, toutes les façons culturales qui ont pour effet de remuer ou de soulever la terre augmentent ces espaces dans de fortes proportions. Ces actions sont d'une évidence telle qu'il n'y a pas lieu d'insister davantage.

En dehors de la pression, qui a pour principal effet de restreindre l'espace intergranuleux, en rapprochant les conglomérats, des causes diverses modifient l'état particulaire et la texture des terrains. Les agents de cimentation sont, en effet, très sensibles à l'action de l'eau et des solutions salines. D'une manière générale, la tendance à former des agglomérats paraît d'autant plus faible que les particules sont plus grosses. Les *substances colloïdales* (argile et humus) favorisent surtout l'agglomération quand la pro-

portion d'eau ne dépasse pas les quarante centièmes de la quantité maximum que la terre peut en retenir. Enfin, les *sels solubles*, même en faible proportion, exercent une grande influence sur la structure du sol. Les alcalis et les carbonates alcalins provoquent un arrangement compact des grains individuels et gênent l'agglomération ; au contraire, les *acides minéraux* et leurs composés (sauf les sulfates neutres alcalins) aident à la floculation. La *chaux caustique* — et à un moindre degré son carbonate — engendre des agrégats légers, peu compacts, dont la résistance dépend de la quantité de matière coagulante. (Wolny.)

La gelée, les pluies, le tassement, les secousses plus ou moins violentes, et surtout l'ébullition avec l'eau, divisent ou détruisent les agglomérats. En somme, la porosité varie avec la nature des terrains. Tandis que dans les sols minéraux le volume des pores oscille entre 20 et 58 pour 100, il atteint 82 pour 100 dans les terres tourbeuses.

Densité ou poids spécifique. — Le poids spécifique du sol dépend de sa constitution et notamment de sa richesse en humus. La *densité réelle* des éléments physiques varie de 1,2 à 2,8 ; celle du sol — abstraction faite des terrains humifères qui sont plus légers — oscille entre 2,5 et 2,6. On la détermine rigoureusement par la *méthode du flaçon ;* elle est indépendante de la texture. La *densité apparente* (poids de l'unité de volume) est sujette à de nombreuses variations, en raison des modifications que le tassement fait subir à l'espace vide ; elle croît avec la pression. Le tableau ci-dessous montre la valeur des diverses densités :

	Densité réelle.	Densité apparente.
Sable fin.	2,69	1,45
Argile pure.	2,50	1,00
Calcaire pur	2,75	»
Humus brut	1,23	0,34
Limon fin	2,65	1,22
Terre (moyenne). . . .	2,62	1,41

D'après M. Whitney, la densité réelle des sols des États-Unis serait comprise entre 2,59 et 2,71 : soit 2,65 en moyenne. Pour une cinquantaine d'échantillons de terres de la Beauce, le poids de l'unité de volume (densité apparente) serait en moyenne, d'après M. Garola, de 1,41 sous une pression de 12 kilos par centimètre carré, et de 1,58 sous une pression de 120 kilos par unité de surface.

Adhérence et cohésion. — Si les substances colloïdales déterminent les variations de volume du sol, elles agissent aussi sur la cohésion et l'adhérence des agrégats terreux.

On nomme *cohésion* la force qui lie les particules. Elle est fonction de la finesse des grains, de la proportion d'argile et de la pression ; elle est minimum, dans les argiles, quand la quantité d'eau est maximum ; pour les autres éléments, il existe un optimum variable avec le degré d'humidité. La *chaux caustique* diminue la cohésion de l'argile humide ; la *potasse*, la *soude* et les *carbonates alcalins* augmentent la cohésion à sec et la diminuent quand la masse est mouillée, ainsi que cela résulte des multiples expériences de Wolny. Pour mesurer l'intensité de la cohésion, on peut, à l'instar de Schübler, soumettre des prismes de terre séchée à l'action de poids de plus en plus forts afin de déterminer l'écrasement des particules ;

mais il est préférable, comme l'a dit Wolny, de calculer la résistance que le sol oppose à la séparation par traction, à la pression ou à la pénétration d'un coin.

On appelle *adhérence* la propriété qu'a la terre d'adhérer aux instruments aratoires en bois ou en fer. Cette force se distingue nettement de la *cohésion*, parce qu'elle ne constitue pas à vrai dire une propriété intrinsèque du sol. *C'est une faculté acquise.* Elle se manifeste quand la terre se trouve en rapport avec l'eau, c'est-à-dire lorsqu'elle est mouillée. L'adhérence est proportionnelle à la surface de contact et à la pression. Plus forte dans un sol à grains isolés que dans un sol granuleux, elle croît quand la dimension des particules diminue. A l'état sec, le pouvoir adhésif est nul. Les alcalis caustiques seuls l'augmentent dans l'argile qui, contrairement aux sables, adhère mieux au bois qu'au fer. Pour déterminer l'adhérence, Schübler s'est servi d'une balance dont l'un des plateaux, formé par une lame de bois ou de fer, était fixé sur la terre humide ; on chargeait l'autre plateau avec des poids jusqu'à ce qu'il se séparât de la matière terreuse.

b) ***Des propriétés extrinsèques.*** — Ce sont les plus importantes à considérer — abstraction faite de la texture du sol — parce qu'elles visent les rapports de la terre avec les agents extérieures : chaleur, air et eau.

1° **Du sol dans ses rapports avec la chaleur.** — Au retour du printemps, une activité vitale nouvelle se manifeste puissante et rapide. En quelques semaines, la végétation renaît, et cette subite renaissance est en grande partie l'œuvre de la *radiation solaire* qui vient échauffer l'atmosphère et le sol, marquant

ainsi, par d'heureux effets, les liens étroits qui semblent rattacher le mouvement vital à la chaleur rayonnante.

On sait, du reste, que le développement des plantes est en rapport avec la température du milieu ambiant. Pour les différentes cultures, les limites s'établissent comme suit (en degrés centigrades) :

	TEMPÉRATURES DE DÉVELOPPEMENT		
	Minimum	Optimum	Maximum
Moutarde, choux.	0	26	37
Blé, orge, avoine.	5	28	49
Maïs, millet, sorguo. . . .	9	33	47
Fèves, haricots, pois. . . .	8	31	42
Concombre, melon	16	36	45

La croissance des végétaux — qui est la résultante de l'ensemble des fonctions physiologiques — dépend surtout de la température des milieux (atmosphère et sol). Ainsi, l'évolution des graines (germination) exige une certaine quantité de chaleur, et tous les cultivateurs savent que les semences confiées à une terre chaude, suffisamment humide et aérée, germent avec plus de rapidité. De même, les chaleurs précoces du printemps favorisent le développement des bourgeons, des bulbes et des tubercules.

En résumé, la température influe :

a) *Au point de vue physiologique* :

1° Sur le réveil de la vie végétale contenue en puissance dans les organes reproducteurs ;

2° Sur l'absorption de l'eau et des principes alimentaires qu'elle contient (le *folletage* de la vigne — caractérisé par le flétrissement des jeunes sarments — serait imputable à l'insuffisance de l'absorption) ;

3° Sur la production de la chlorophylle et sur toutes les fonctions qu'elle commande : *assimilatton chlorophyllieune* et *chlorovaporisation* (transpiration diurne) dont l'optimum serait serait voisin de 40° ;

4° Sur l'intensité de la respiration : l'optimum, d'après Kreusler, étant compris entre 40 et 45° ;

5° Sur la feuillaison, la floraison et la maturation.

b) Au point de vue physico-chimique : sur l'activîté biologique du sol (fermentations) et sur tous les phénomènes de dissolution (dissolution des gaz et des matières nutritives dans les eaux qui circulent au sein de la terre arable).

A l'origine, pour nos cultures herbacées, c'est surtout la température du sol qui règle l'évolution des végétaux (1). Les essais que nous poursuivons à Grignon en fournissent la preuve. Ainsi, l'année dernière, en suivant le développement progressif de la luzerne, nous avons nettement observé que la *courbe de croissance* n'est pas toujours semblable à la *courbe des températures* atmosphériques. De fait, le refroidissement de l'air agit de deux manières : s'il persiste assez longtemps pour provoquer une variation sensible de la température du sol, la végétation s'en ressent et la courbe du développement fléchit ; au contraire, s'il est subit ou momentané (sans descendre au-dessous de zéro), la chute de la température du sol étant faible et superficielle, la végétation ne paraît pas subir de ralentissement.

Mais dans quelle mesure le sol peut-il accumuler ou disperser l'énergie calorifique ? Ainsi se pose la question. Comme tous les corps, la terre arable

---

(1) Pour que la plante se développe normalement, il faut encore que la chaleur se répartisse d'une façon convenable pendant la période de croissance. Les agronomes qui on établi la *somme des températures* nécessaire à une culture donnée n'ont pas manqué de tenir compte du nombre de jours pendant lesquels la plante devait végéter. Il eut été préférable de fractionner le temps du développement et de faire état simultanément des températures du sol et de l'atmosphère, en raison même des variations climatériques qui deviennent parfois excessives dans certaines régions.

reçoit de la chaleur et en émet. Elle en reçoit du *soleil,* du *noyau central,* des *corps chauds* qui l'environnent et des *réactions exothermiques* qui se produisent en son sein ; elle en cède à l'air par rayonnement, et à l'eau par convection. De là résultent des échanges continuels impliquant de constantes variations dans la température du sol.

Température du sol. — On peut admettre que les *deux tiers* de la chaleur que le soleil envoie à la surface du globe sont reçus directement par la terre végétale. Une partie de ce calorique sert à l'échauffement de l'air ambiant qui accuse — sauf de rares exceptions — une température moins élevée que celle du sol, comme le montrent les observations suivantes faites à Orange, par de Gasparin, durant une quinzaine d'années (1836 à 1850) :

	TEMPÉRATURES MENSUELLES MOYENNES	
	de l'air.	du sol.
Janvier	6,7	6,7
Février	10,1	12,7
Mars	14,1	19,1
Avril	16,9	25,5
Mai	23,0	27,6
Juin	27,9	40,9
Juillet	31,0	45,3
Août	30,2	43,1
Septembre	24,3	31,4
Octobre	20,0	20,2
Novembre	12,5	12,1
Décembre	8,5	5,9

Quand on compare la température de la terre à celle des corps opaques secs exposés à la même radiation, on trouve, en faveur de ceux-ci, une différence positive de 5° environ. Dans les régions septentrio-

nales, l'échauffement est moindre, mais les résultats généraux sont à peu près de même sens.

Les couches superficielles du sol, qui sont au contact direct de l'atmosphère, abandonnent toujours de notables quantités de chaleur, et ce rayonnement constant a pour principal effet d'accroître la température de l'air ambiant. Pour s'en faire une idée, il suffit de suivre les variations thermiques au niveau du sol et à un plus d'un mètre de sa surface. Les températures ainsi relevées à l'observatoire de Montsouris, depuis une trentaine d'années, sont intéressantes à comparer :

	TEMPÉRATURE DE L'AIR (moyennes mensuelles)	
	à 1 mètre.	près du sol.
Janvier	2,6	2,8
Février	4,0	5,5
Mars	6,8	9,4
Avril	10,3	14,5
Mai	13,5	19,1
Juin	17,1	23,0
Juillet	18,7	24,4
Août	18,5	23,8
Septembre	15,8	19,7
Octobre	10,5	12,2
Novembre	6,8	7,7
Décembre	2,9	3,0

Les différences observées sont du même ordre que précédemment. S'il était possible d'immobiliser et de sectionner la couche d'air, on obtiendrait une progression croissante et régulière des températures jusqu'au ras de la terre.

Les observations thermométriques faites dans le sol même, à diverses profondeurs, ne sont pas moins

curieuses. A mesure qu'on s'éloigne de la surface, où les perturbations sont bien plus fréquentes, les oscillations de température décroissent progressivement : l'inflexion de la courbe thermique s'atténue, et celle-ci se rapproche de plus en plus de l'axe horizontal figurant la *ligne d'égale température* qu'on trouverait à 25 mètres de profondeur environ.

Dans le tableau suivant, je rapporte les nombres moyens obtenus à la surface (entre $0^m,10$ et $0^m,20$), à $0^m,80$ et à $1^m,50$ de profondeur.

	TEMPÉRATURES MOYENNES DU SOL		
	à $0^m,15$.	à $0^m,80$.	à $1^m.50$.
Hiver	4,6	6,8	7,5
Printemps	13,3	14,2	10,3
Été	18,9	16,1	12,8
Automne	6,4	8,6	11,0

Les écarts entre les maxima et les minima atteignent respectivement 14°,3 pour la première zone, 9°,3 pour la seconde et 5°,3 pour la troisième.

Les variations diurnes et nocturnes de la température du sol ne sont pas moins sensibles : la température s'abaisse considérablement durant la nuit. Il semble, comme l'a très bien dit E. Duclaux, « *que la terre soit un réservoir de chaleur du jour pour la nuit, de l'été pour l'hiver ;* il ne conserve rien de ce qu'on y verse pour l'alimenter, mais il en régularise le débit ».

Échauffement du sol. — Dans les conditions naturelles, il est très difficile de déterminer exactement la quantité de chaleur emmagasinée par la terre, en raison des influences diverses qui peuvent se faire sentir : structure, orientation, inclinaison, degré d'humidité, etc. Pour un milieu donné, il faut tenir

compte de la *chaleur spécifique* et de la *conductibilité* du sol, de l'excès de température des milieux ambiants et de la chaleur perdue par rayonnement ou employée à l'évaporation de l'eau : la chaleur gagnée étant égale à la différence entre la *chaleur totale* reçue par la terre et la *chaleur perdue* d'autre part (1).

Le sol, étant un mélange de substances solides, d'eau et d'air, possède naturellement une *chaleur spécifique* variable avec celle des éléments. Pour ceux-ci, Wolny donne les nombres suivants : quartz (0,292), argile (0,233), humus (0,165) ; le calcaire et l'oxyde de fer se placent entre le quartz et l'argile (2). D'après Pfaundler, la chaleur spécifique des divers sols varie depuis 0,19 (sables purs) jusqu'à 0,27 (terres ordinaires) et 0,40 (sols tourbeux).

Influence de l'humidité. — L'expérience montre que les terrains humides exposés à la chaleur solaire s'échauffent moins rapidement que les autres. Cela tient à la différence des chaleurs spécifiques. D'après M. Œmler, pour des éléments secs ou saturés d'eau, on observerait les variations suivantes :

---

(1) On mesure pratiquement la faculté d'absorption de la chaleur par la terre en appliquant la formule suivante :

$$n = \frac{(\theta - t)\,100}{T - t}$$

dans laquelle t représente la température du sol à l'ombre ; θ celle de sa surface exposée au soleil et T celle de l'actinomètre (thermomètre à boule noire).

(2) Schübler calculait la *capacité calorifique* des éléments et des terres en fonction du temps nécessaire à leur refroidissement. Après les avoir portés à une température donnée (62°5), il les laissait refroidir dans une atmosphère maintenue à 16°2. En égalant à 100 la capacité calorique du *sable calcaire*, on obtient respectivement 95,6 pour le *sable siliceux*, 66,7 pour l'*argile pure*, et 49 pour l'*humus*. Les matières sableuses, d'après ces données, sont celles qui conservent le mieux la chaleur.

	CHALEURS SPÉCIFIQUES	
	État sec	État humide
Eau	1,00	1,00
Tourbe	0,11	0;72
Limon	0,18	0,53
Argile	0,15	0,61
Sable	0,12	0,34

La chaleur spécifique de l'eau étant égale à 1, l'humidité augmente considérablement celle des autres éléments, et ce sont les plus avides d'eau : l'humus et l'argile, qui se placent en première ligne. Il en serait de même si l'on envisageait le pouvoir absorbant et la conductibilité de la terre pour la chaleur.

Masure a déterminé l'influence du degré d'humidité sur l'échauffement des sols exposés au soleil. « Plus la terre est humide, plus sa température se « rapproche de celle de l'air ; elle l'excède environ « de 4° à demi-saturation et de 10° à l'état sec. Pen- « dant la nuit, quel que soit le degré d'humidité, la « température du sol est inférieure de 2 à 3 degrés à « celle de l'air. Après les pluies, la radiation solaire « détermine un échauffement beaucoup plus intense « qu'après les périodes de sécheresse. » Dans tous les cas, il importe de retenir que la température du sol — à égale quantité de chaleur reçue — est en raison inverse de sa chaleur spécifique.

Influence du tassement. — Le *tassement* du sol influe également sur son état thermique. A cet égard, Wolny formule les conclusions suivantes :

1° Le sol conduit d'autant mieux la chaleur qu'il est plus tassé, parce qu'il contient alors moins d'air et plus d'eau (celle-ci étant meilleure conductrice).

2° Pendant la saison sèche, quand la température augmente, et au moment du maximum diurne de la température du sol, celui-ci s'échauffe d'autant plus qu'il est plus serré ; au contraire, pendant la saison froide, quand la température baisse, et au moment du minimum diurne, la température est la même pour les sols meubles et tassés, l'avantage restant parfois au sol meuble.

3° Plus le sol est tassé, plus les oscillations de température sont grandes.

L'influence de la chaleur centrale du globe — étant donnée la grande épaisseur de l'écorce terrestre — n'intervient que très faiblement dans l'échauffement du sol. On peut en dire autant pour les actions chimiques et les combustions lentes qui se produisent dans la terre arable... Une fumure de 30,000 kilogr. de fumier donnerait, d'après M. SCHLŒSING, 17 millions de calories qui, en se répartissant sur 3,000 tonnes de terre, au cours d'une année, élèveraient de 0°,078 la température moyenne du sol. C'est donc la *radiation solaire* surtout qui contribue à l'échauffement des terrains et du milieu ambiant.

MOUVEMENT DU CALORIQUE. — La terre possède, comme les autres corps, un *pouvoir absorbant* et un *pouvoir émissif :* elle absorbe des radiations calorifiques et lumineuses, mais elle n'émet que des radiations obscures. Le mouvement thermique qui se produit en elle dépend moins de sa nature et de sa composition que de la marche et de l'intensité de la radiation solaire. En ce qui concerne la *marche diurne* de la température du sol, on observe une progression croissante depuis le lever du soleil jusqu'aux premières heures de l'après-midi ; la température décroît ensuite progressivement jusqu'au lever du jour suivant. Dans tous les cas, à cause

de la mauvaise conductibilité de la terre, la propagation de la chaleur se fait toujours très lentement. On constate, par exemple, que le maximum de température se produit vers midi à la surface du sol, et à six heures seulement à la profondeur de $0^{m},25$.

Cette lenteur de mouvement peut avoir d'heureux effets sur la végétation parce qu'elle assure plus de constance dans la température. Au-delà d'une certaine profondeur, les variations deviennent tellement faibles que les racines des plantes ne sont jamais exposées aux désagréments des gelées.

Dans son très intéressant et remarquable traité de *Physique et Météorologie*, E. Duclaux explique ainsi l'action du soleil sur le sol : « Pendant le jour, le « soleil échauffe par conductibilité les couches voi- « sines de la surface, et peu à peu s'enfonce une *onde* « *journalière* de chaleur qui, la nuit venue, quand le « sol se refroidit par rayonnement et au contact de « l'air, remonte vers la surface. Comme elle ne mar- « che pas vite, elle n'a pas fait beaucoup de chemin « quand elle commence à rétrograder, et il y a par « suite dans le sol, à petite profondeur, une couche « à peu près insensible à la variation de la tempéra- « ture du jour et de la nuit. Cette couche est naturel- « lement d'autant plus profonde que la variation est « plus grande et le sol plus conducteur. Aussi on la « trouvera plus bas dans un pays sec que dans un « pays humide, sur un sol dénudé que sur un sol « couvert de végétation, etc...

« On devine pourtant que la compensation dont « nous venons de parler n'est pas absolue. Pendant « l'été, la nuit, beaucoup plus courte que le jour, ne « suffit pas à permettre la sortie de toute la chaleur « emmagasinée, et il en reste un petit excédent qui « continue à pénétrer dans le sol. En s'unissant aux

« excédents des jours précédents, il finit par consti-
« tuer une *onde estivale* de chaleur, qui est à son tour
« contrebalancée par une *onde hibernale* de froid.
« Pour les mêmes raisons que tout à l'heure, il y aura
« donc, à une certaine profondeur, une couche qui ne
« sera plus influencée par les variations de tempéra-
« ture de l'hiver et de l'été.

« Entre cette couche invariable, à laquelle vien-
« nent mourir les ondes estivales et hibernales de la
« surface du sol, et cette surface dont elles partent,
« le trajet est long, et il y a toujours plusieurs ondes
« en chemin. Un thermomètre plongé dans le sol, et
« qui traduit leur passage, subit donc des oscillations
« périodiques, et peut, par exemple, monter, c'est-à-
« dire traduire le passage d'une onde estivale au mo-
« ment où c'est l'hiver à la surface et où le thermo-
« mètre descend. Mais ces oscillations décroissent
« d'amplitude avec la profondeur jusqu'au point où
« elles deviennent insensibles et où la température
« reste invariable. »

La *marche annuelle* de la température du sol présente les mêmes caractères que la *marche diurne*... « Pendant la saison chaude de l'année, les tempéra-
« tures du sol vont en décroissant avec la profon-
« deur ; pendant la saison froide, elles affectent, au
« contraire, une distribution inverse. Lorsque la tem-
« pérature croît avec la profondeur, la chaleur sort
« du sol ; elle y pénètre, au contraire, lorsque le sol
« est plus chaud à la surface que dans ses couches
« inférieures. La migration de la chaleur dans le sol
« présente donc deux phases distinctes : avec le mois
« de mars commence la période d'emmagasinement ;
« avec le mois de septembre, celle de l'émission des
« radiations calorifiques accumulées pendant les mois
« précédents. A Montpellier, la période d'inversion
« dans la distribution des températures à diverses

« profondeurs est plus courte en automne qu'au prin-
« temps (1) ».

2° **Du sol dans ses rapports avec les gaz.** — La capacité du sol pour l'air — la porosité — s'exprime par le rapport du volume des pores au volume total de la terre; elle varie avec la structure, la pression et le degré d'humidité (les volumes d'air et d'eau pour un sol donné étant complémentaires). Toutefois, l'influence de l'eau est moins marquée dans les terres grumeleuses que dans les terres en poudre, celles-ci contenant plus d'espaces capillaires qui se remplissent rapidement.

On peut admettre, d'une manière générale :

1° Que la porosité croît avec la grosseur des particules et la proportion de sable. A l'état sec, cependant, les sols très humifères se comportent comme des sables grossiers ;

2° Que la quantité d'air passant au travers d'une terre est en raison inverse de l'épaisseur de la couche et en raison directe de la pression de l'air, tant que la vitesse de passage n'excède pas *cinq centimètres* par seconde ;

3° Que l'air confiné dans le sol est presque toujours en mouvement : soit qu'il se diffuse entre les particules, soit qu'il se produise des échanges entre l'atmosphère et la terre, sous l'influence des variations de pression, de température, etc...

La terre peut-elle, au sens physique du mot, *absorber ou condenser certains gaz ?* On le croyait autrefois. Mais, à l'exception de l'ammoniaque, qui peut se combiner à l'humus et à l'oxyde de fer, et de l'absorption de la vapeur d'eau — *hygroscopicité* —

(1) F. Houdaille : *Le soleil et l'agriculteur*, p. 259. Librairie Masson, Paris.

il ne semble pas que des condensations aient lieu. C'est du moins ce qui résulte des expériences très précises de M. Th. SCHLŒSING.

HYGROSCOPICITÉ DU SOL (2). — Pour mesurer l'hygroscopicité, SCHÜBLER étalait en couches minces 5 *grammes de terre sèche* dans une atmosphère saturée d'humidité. Il vit ainsi que l'absorption de la vapeur d'eau atmosphérique est très inégale : le *sable siliceux* pur n'est pas hygroscopique. Voici les nombres trouvés pour les autres éléments :

	VAPEUR D'EAU ABSORBÉE POUR 100 APRÈS			
	12 heures.	24 heures.	48 heures.	72 heures.
Sable calcaire.	0,2	0,3	0,3	0,3
Argile pure .	3,7	4,2	4,8	4,9
Humus brut .	8,0	9,6	11,0	12,0

En opérant sur différents sols, SCHÜBLER reconnut qu'une terre de jardin pouvait absorber 3 à 5 pour 100 d'eau, entre douze et quarante-huit heures. M. SCHLŒSING explique ainsi cette faculté : « La proportion d'eau absorbée par un corps augmente « avec la surface qu'il offre sous un poids donné. « De deux terres de même nature, la plus fine se « chargera par hygroscopicité de plus d'eau que « l'autre. Il suffit qu'un sol ait 5 pour 100 d'eau « pour que celle-ci y possède la tension maxima cor-

(2) L'étude des facultés hygroscopiques du sol pourrait être rattachée au paragraphe traitant « *du sol dans ses rapports avec l'eau* ». Mais il s'agit, en fait, de la condensation de la vapeur d'eau (c'est-à-dire d'un corps gazeux), et nous avons cru préférable d'envisager séparément la question. Puisque la terre est en contact avec les gaz de l'air — dont la vapeur d'eau fait partie — il semble plus rationnel de rattacher l'hygroscopicité au présent chapitre.

« respondant à sa température. Entre 9 et 35 degrés « l'hygroscopicité varie très peu avec la température, « ce qui signifie qu'une terre supposée en équilibre « d'humidité avec l'atmosphère ambiante gardera la « même quantité d'eau, si l'*état hygrométrique* de « l'air reste constant. C'est ce dernier facteur qui « influe le plus. Si la tension de la vapeur d'eau est « plus forte dans l'air que dans le sol, celui-ci gagne « jusqu'à ce que le régime soit établi ; dans l'hypo- « thèse contraire, il perd. La nature de la surface « influe aussi sur l'hygroscopicité : quand elle est « revêtue d'humates, elle absorbe davantage. »

Le sable fin extrait de la terre fixe toujours plus d'eau à l'état naturel qu'après calcination. Dans la plupart des cas, l'absorption de la vapeur est accompagnée d'une légère élévation de température, comme s'il se produisait alors un véritable changement d'état physique.

Ainsi, conformément aux lois de la physique, *le sol condense ou émet de la vapeur d'eau pour se tenir dans les limites de l'équilibre des tensions hygrométriques du milieu ambiant.*

Une autre question se pose : l'eau d'hygroscopicité influe t-elle sur le développement des végétaux ? On le croyait autrefois... Mais les expériences effectuées successivement par Sachs et Heinrich montrent qu'il n'en est rien. Des pieds de tabac cultivés dans des terres plus ou moins argileuses, sablonneuses et humifères, se fanent et dépérisent avant que toute l'eau du sol ait été utilisée.

Les résultats obtenus par M. Heinrich valent d'être rapportés :

	Pour 100 de terre sèche		
	Eau nécessaire à la saturation	Eau fixée par hygroscopicité	Eau restant quand la plante périt
Sable grossier . . .	25,5	0,55	1,50
Terre sableuse . . .	43,9	1,68	4,60
Sable humifère . . .	41,4	0,97	6,20
Terre silico-argileuse .	43,4	2,50	7,80
Terre argilo-calcaire .	38,3	3,65	9,80
Terre tourbeuse . . .	274,0	20,60	49,70

M. King a fait de semblables observations sur les cultures de trèfle et de maïs. Ainsi, dans tous les cas, les plantes se flétrissent et meurent alors même que le sol contient encore une proportion d'eau bien supérieure à celle que peuvent lui procurer ses facultés hygroscopiques... Le calcul permet d'établir que *la végétation cesse lorsque l'épaisseur de la couche aqueuse enveloppant les particules devient inférieure à soixante-quinze centmillièmes de millimètre.*

3° **Rapports du sol avec l'eau.** — L'élaboration des principes immédiats exige d'énormes quantités d'eau. On estime, en effet, que pour produire un gramme de matière sèche la plante met en œuvre 300 grammes d'eau environ dans les conditions ordinaires. Ce sont les réserves du sol et du sous-sol (quand celui-ci est perméable) qui doivent faire face aux besoins de la végétation. Dès lors, on comprend toute l'importance que présente l'étude de la terre arable comme *réservoir d'humidité.*

A vrai dire, la proportion d'eau contenue dans le sol est extrêmement variable d'un moment à l'autre. Elle dépend à la fois de la structure, de la profondeur, de la position et de l'état de la surface, ainsi que des conditions météorologiques : abondance des pluies, température ambiante, etc... Pour une terre donnée

— abstraction faite des milieux extérieurs — c'est la texture surtout qui règle la *perméabilité* et la *capacité du sol* à l'égard de l'eau. Si la nature des terrains diffère sensiblement, il faut, de plus, tenir compte de leur constitution physique, en raison de la diversité des caractères propres à chacun des éléments dominants. Et d'abord, comment s'effectue le partage de l'eau entre l'atmosphère et le sol ?

Emmagasinement de l'eau dans le sol. — On évalue à plus de 500 millimètres la hauteur moyenne de la pluie qui tombe annuellement dans la région parisienne. Une fraction de cette colonne d'eau fait retour à l'atmosphère, par suite de l'évaporation, tandis que le restant s'emmagasine ou s'infiltre dans la couche arable. Dehérain établit ainsi cette répartition pour différentes terres de la Guadeloupe mises en expérience :

	Pour 100 de l'eau tombée			
	Terre légère		Terre forte	
	meuble	tassée	meuble	tassée
a) Eau emmagasinée.	22,9	34,9	21,9	10,2
b) Eau infiltrée . . .	64,4	3,00	64,4	9,6
c) Eau évaporée . .	12,7	35,0	13,6	80,1
Somme de *a* + *b* . .	87,3	64,9	86,3	19,8

En tenant compte simplement de l'eau emmagasinée ou infiltrée dans le sol et le sous-sol, on voit que les terres meubles retiennent plus des *quatre cinquièmes* de la pluie tombée, tandis que les sols tassés, sur lesquels le ruissellement est plus facile, en absorbent beaucoup moins. Les différences sont encore plus sensibles dans la terre forte en raison de sa trop faible perméabilité. Quand les particules

superficielles sont désagrégées, l'eau stationne plus longtemps à la surface, et les pertes par évaporation deviennent alors considérables.

Dans les terrains profonds et perméables, l'eau d'infiltration n'est pas irrémédiablement perdue pour la culture. A mesure que les réserves des couches supérieures s'épuisent, un *courant ascendant* s'établit, et l'eau remonte progressivement. C'est à ce moment que le sous-sol intervient comme *régulateur d'humidité*.

Pendant quatre périodes consécutives — de fin avril à fin octobre — M. Pagnoul a déterminé la quantité de pluie tombée, l'eau évaporée et le degré d'humidité du sol (à 0,05) et du sous-sol (à 0,30). En rapportant à la surface d'un are les résultats obtenus, on trouve, en litres, pour chacune des périodes :

	du 30 avril au 30 mai	du 30 mai au 9 juillet	du 9 juillet au 7 sept.	du 7 sept. au 27 oct.
Pluie tombée. . .	470	11520	8820	14340
Eau évaporée . . .	8770	7520	14490	4650
Perte du sol . . .	2535	»	615	»
Grain du sol . . .	»	3555	»	1545
Perte du sous-sol .	5765	»	5055	»
Grain du sous-sol .	»	445	»	8145

Quand la pluie est rare et l'évaporation active, le sous-sol cède une forte quantité d'eau : il y a perte de part et d'autre (1re et 3e périodes) ; dans le cas contraire, l'emmagasinement se manifeste, et quand le sol est saturé, c'est le sous-sol qui s'enrichit sensiblement.

Capacité du sol pour l'eau. — En raison de sa structure poreuse, la terre arable peut retenir une forte quantité d'eau qui vient se loger dans les espaces lacunaires. Quand ceux-ci sont entièrement saturés, on dit que la *faculté d'imbibition* est satisfaite. Le volume d'eau nécessaire à la saturation varie

beaucoup suivant la structure et la constitution physique des terrains. On trouve, pour les éléments mécaniques, les quantités suivantes :

	EAU NÉCESSAIRE A LA SATURATION DE 100 GRAMMES DES DIVERS ÉLÉMENTS	
	d'après Schübler	d'après Masure
Sable.	25	19
Calcaire. . . .	85	42
Argile	70	84
Humus	190	103

Bien que les nombres ne concordent pas, on peut admettre que l'humus et l'argile sont les composants du sol qui retiennent le maximum d'eau. Il est évident, *a priori*, que la faculté d'imbibition des terres offrant le même espace lacunaire dépend surtout du *degré humique* et du *degré argileux*. Dans les sols de même constitution, au contraire, c'est l'arrangement des particules et le volume des espaces vides qui déterminent la valeur de l'imbibition. Il importe, dans tous les cas, d'opérer sur des matériaux soumis à la même pression : on obtiendra ainsi des résultats satisfaisants, les conditions expérimentales étant sensiblement identiques.

Pour mesurer la faculté d'imbibition, Schübler prenait une quantité déterminée de terre sèche qu'il plaçait dans des filtres (sur des entonnoirs) et au travers de laquelle il faisait passer de l'eau jusqu'à refus. En retranchant du poids total, après saturation complète, le poids de l'entonnoir, celui de la terre et du filtre humide, on obtenait la proportion d'eau absorbée. Cette méthode conduit à des résultats exagérés.

Il est bien préférable, à l'instar de Schlœsing, d'immerger la terre dans des manchons dont la partie infé-

rieure est fermée par une toile assez fine pour maintenir les particules, tout en permettant un ressuyage rapide. A mesure que les éléments tombent dans l'eau, ils se répartissent par ordre de grosseur et de densité. Après égouttage, on dose l'humidité, pour connaître la proportion maximum d'eau restant dans le sol.

En fait, puisque ce sont les *espaces vides* qui se remplissent, les *coefficients d'imbibition* doivent être proportionnels à ces espaces, et il suffirait de mesurer ceux-ci pour connaître ceux-là.

Contrairement à ce qu'on suppose, les terres argileuses gardent moins d'eau à cause de l'agglomération des particules par le ciment colloïdal. La structure joue donc un très grand rôle dans la faculté d'imbibition comme dans la *perméabilité.*

En examinant une colonne de terre humide, on voit que l'humidité est maximum à la partie inférieure ; elle décroît ensuite de bas en haut et se maintient constante à partir d'une certaine hauteur. Dans les couches supérieures, le liquide n'est retenu que par la *tension superficielle* et la *capillarité* de très petits espaces, tandis qu'il s'écoule des plus grands ; dans le bas, les larges espaces mêmes retiennent l'eau. Il y a donc une *capacité minimum* en haut et une *capacité maximum* en bas. Les capacités maxima de sols normaux ou moyens diffèrent peu, parce que les vides y sont sensiblement égaux. Les alternatives de gel et de dégel modifient la structure des terres argileuses et abaissent leur faculté d'imbibition.

Perméabilité du sol. — L'eau ne s'infiltre pas avec la même facilité dans toutes les terres. Quand les éléments fins abondent, l'écoulement subit un ralentissement considérable, et la mesure du temps nécessaire pour faire passer un égal volume de

liquide sur des sols différents — placés dans les mêmes conditions expérimentales — permet alors d'apprécier assez rigoureusement le degré de perméabilité. Mais il importe que ces déterminations soient faites sous une pression constante, puisque les moindres variations influent sur la vitesse d'écoulement.

M. Garola se sert d'un appareil dont l'alimentation continue et régulière est assurée par un flacon de Mariotte qui envoie l'eau dans un second récipient à niveau constant, auquel on adapte le manchon renfermant un poids connu de terre uniformément tassée que supporte une toile très fine (toile n° 200). L'eau qui s'égoutte du sol tombe dans un entonnoir qui la déverse dans une sorte de pluviomètre enregistreur. On obtient ainsi des *courbes de perméabilité,* d'allure différente suivant la nature des terrains, qui reproduisent fidèlement la marche de l'écoulement en un temps donné (1).

Les variations de la perméabilité sont surtout imputables :

1° *A la structure* physique du sol qui dépend de la finesse et de l'arrangement des particules ;

2° *Au taux d'argile* parfois très différent d'une terre à l'autre ;

3° *A la nature des sels* dissous dans les eaux qui imprègnent les agglomérats terreux.

D'une manière générale, pour un sol donné, *la perméabilité croît avec l'espace vide.* Il suit de là que toute cause susceptible de diminuer ou d'augmenter cet espace agira dans le même sens sur la vitesse d'écoulement ou de passage de l'eau. C'est pourquoi

(1) Pour montrer l'inégale perméabilité des sols ou des éléments qui les constituent, on peut aussi employer l'appareil de MM. Dehérain et Demoussy.

l'abondance des colloïdes et la présence de matières susceptibles de modifier la floculation influent à un haut degré sur la perméabilité. Cela résulte manifestement des nombreuses expériences de Wolny et de celles plus récentes de M. Garola. *Quand les espaces lacunaires sont égaux, l'influence du taux d'argile devient très apparente.* Les nombres suivants, donnés par M. Garola, montrent nettement l'action de la finesse des éléments, de l'espace vide et du degré argileux :

DÉSIGNATION DES ÉCHANTILLONS	ESPACE VIDE °/o	EAU ÉCOULÉE EN 24 H. EN C³	COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ
1° Éléments séparés du sol :			
Sable (diamètre 175 µ.)	46,50	2344	1,000
Limon (diamètre 37.5 µ. . . .	50,31	119	0,051
Limon fin (diamètre 15 µ.) . .	91,33	19	0,007
Argile brute (diamètre 2.55 µ.) .	90,98	9	0,001
2° Terres fines diverses (1) :			
Houx (argile 2.88 °/o)	50,00	62,80	3,55
Bailleau (argile 15.6).	50,00	22,80	1,28
Archevilliers (argile 21.5) . . .	50,00	17,70	1,00
Poiffonds (argile 37.2)	50,00	9,17	0,52
Gué de Longroy (argile 51 7). .	50,00	3,50	0,20

L'influence des sels n'est pas moins manifeste. En étudiant la vitesse d'écoulement de l'eau dans des

(1) Les coefficients de perméabilité sont rapportés à la terre d'Archevilliers prise pour unité.

terres ayant reçu des composés calciques, sodiques, potassiques, ammoniacaux et magnésiens, on constate de très sensibles variations. A l'exception des sels de soude, qui diminuent la perméabilité, tous les autres l'accroissent plus ou moins. Le tableau suivant résume les expériences faites sur ce sujet par M. Garola :

NATURE ET DOSE DES SELS EMPLOYÉS	VARIATIONS DE LA PERMÉABILITÉ	
	augmentation pour 100.	diminution pour 100
Chlorure de calcium (1.27 °/oo). .	190	»
Nitrate de calcium (1 °/o). . . .	50	»
Sulfate de calcium (1.24 °/oo) . .	35	»
Superphosphate de chaux (1.4 °/o)	25	»
Chlorure de sodium (2 °/oo). . .	»	»
Nitrate de sodium (2.5 °/oo) . . .	»	80
Sulfate de sodium (2.5 °/oo). . .	»	70
Phosphate de sodium (2 °/oo) . .	»	82
Carbonate de sodium (2 °/oo) . .	»	4600
Chlorure de potassium (2 °/o) . .	70	»
Sulfate de potassium (2 °/o). . .	33	»
Nitrate de potassium (2 °/oo). . .	33	»
Phosphate de potassium (2 °/oo) .	faible	»
Sulfate d'ammoniaque (2 °/oo) . .	27	»
Chlorure de magnésium (2 °/oo) .	39	»
Sulfate de magnésie (2 °/oo). . .	44	»

Tous ces essais (sauf pour le chlorure de calcium) ont été effectués sur la terre limoneuse d'Archevilliers dosant pour 100 :

Sable siliceux	14,40
Limon siliceux	64,40
Limon calcaire.	0,05
Argile brute.	21,15

On comprend très bien que les composés calcique,

accroissent la perméabilité et que le volume d'eau recueilli après 24 heures soit considérablement plus élevé Ces corps déterminent la coagulation de l'argile et provoquent une meilleure agglomération ; en outre, ainsi que je l'ai observé maintes fois, ils mobilisent la potasse et transforment ainsi une fraction de l'argile colloïdale en argile non colloïdale. Mais on ne voit pas pourquoi les sels de soude et de potasse exercent une action toute différente. A cet égard, les résultats de l'expérience paraissent plutôt douteux. J'ai reconnu, en effet, il y a une dizaine d'années, que les alcalis et les carbonates alcalins fixes modifient la nature et la plasticité de l'argile : *le degré colloïdal augmente.* Et l'action du *carbonate de sodium,* qui est cinquante fois supérieure à celle des autres sels sodiques — dans ce sol très pauvre en calcaire — permet de supposer que le *carbonate de potasse* aurait produit le même effet.

La moindre influence des autres sels alcalins s'expliquerait par ce fait que leur transformation en carbonate n'est guère possible en raison de l'absence du calcaire terreux. D'autre part, leur dédoublement aboutit à la production d'un sel de chaux dont l'influence contraire peut, au début, modifier ou masquer le sens du phénomène. La moindre intensité des composés sodiques et potassiques, par rapport aux carbonates, ne peut avoir, selon nous, d'autre cause déterminante.

Nous admettrons donc que si les composés calciques augmentent la perméabilité, les alcalis et les sels alcalins, amenés à l'état de carbonates, agissent toujours en sens inverse, mais à des degrés différents, suivant leur nature et la richesse du sol en calcaire.

Mouvement de l'eau dans le sol. — Il se produit, dans le sol, des mouvements incessants qui ont pour

résultat de renouveler le contact des fluides avec les particules terreuses. Ces mouvements sont dus à des causes multiples : *pesanteur, attraction moléculaire, évaporation*. La *pesanteur* détermine un *courant descendant :* elle permet à l'eau de s'infiltrer et de s'emmagasiner dans les couches profondes ; *l'évaporation*, au contraire, provoque un *courant ascendant :* elle ramène l'eau vers la surface. Quant aux *actions moléculaires*, elles se manifestent entre les particules et tendent surtout à rétablir l'équilibre à chaque instant troublé. Il convient de remarquer, en effet, que si les molécules de liquide étaient soumises à la seule influence de la *tension superficielle*, elles n'auraient pas assez de mobilité pour provoquer un écoulement (infiltration) : les échanges ne se produiraient alors que par diffusion. Quand les canaux capillaires sont trop étroits (sols essentiellement argileux), l'infiltration de l'eau s'affaiblit, l'écoulement s'arrête, parce que tout le liquide est soumis à l'attraction moléculaire. Celle-ci varie avec la nature des solutions : les engrais alcalins accroissent la tension superficielle de l'eau, tandis que les superphosphates et surtout les matières organiques (humates) la diminuent, comme en témoigne le tableau suivant :

VALEURS DE LA TENSION SUPERFICIELLE (en dynes par cm^2)

NATURE DES LIQUIDES	DENSITÉ	TENSION
Eau pure	1,000	7,532
Eau salée.	1,100	7,911
Eau+kaïnite	1,100	7,900
Eau+nitrate	1,100	7,730
Eau+superphosphate. . . .	1,0014	7,414
Jus de fumier	1,0013	7,464
Extrait de terre.	1,000	7,244
Eau de jardin	1,000	7,089

Pour une même terre, l'évaporation dépend à la fois de la température, de l'état hygrométrique et du renouvellement de l'air ambiant. Dans des sols de nature différente, il faut tenir compte aussi du degré de finesse des particules qui favorise les *actions attractives* ou moléculaires, la *capillarité* surtout, et fait affluer une grande quantité d'eau vers les régions supérieures. D'une manière générale, les terres à éléments grossiers se dessèchent plus vite que les autres.

Pour expliquer les mouvements de l'eau dans le sol, on peut supposer que les grains d'une terre ressuyée sont entourés d'un certain nombre de couches d'eau très minces et concentriques ; les pores étant remplis d'air et d'eau, l'équilibre se trouve nécessairement établi quand le nombre et l'épaisseur de ces couches sont les mêmes. Dès que l'évaporation a lieu, les particules superficielles abandonnent l'eau des couches extérieures ; l'équilibre est alors rompu, et un mouvement général se produit, d'une particule à l'autre, avec des manifestations ou des intensités très différentes suivant l'éloignement et la structure des agglomérats terreux.

Toutefois, la facilité des échanges est loin d'être toujours semblable. Tandis que les couches d'eau extérieures cèdent facilement, les plus rapprochées de l'agrégat terreux offrent une grande résistance. Comme elles sont en rapport direct avec la particule solide, la *tension superficielle* a une plus grande valeur, et l'intensité de cette force attractive contrebalance l'évaporation. On voit que l'extrait aqueux de la terre de jardin, riche en composés humiques, accuse une tension sensiblement inférieure à celle de la solution extraite d'un sol ordinaire.

Ces considérations ne sont pas inutiles pour l'interprétation du mouvement de l'eau. Plus la tension

est élevée, plus elle fait obstacle à la circulation. Et voilà pourquoi les engrais salins retiennent l'eau dans les couches superficielles du sol, parfois même au détriment des cultures.

Enfin, c'est encore en vertu de ces attractions moléculaires que les terres ne se dessèchent jamais complètement au soleil. De fait, l'expérience montre qu'un sol exposé à l'air et maintenu à l'abri des pluies n'abandonne jamais la dernière couche d'eau qui semble ainsi faire partie intégrante de la molécule (1). Les plantes mêmes ne peuvent l'utiliser, puisqu'elles se fanent et dépérissent avant que le sol soit entièrement desséché. Il suit de là qu'en aucun cas la dessiccation spontanée n'est intégrale.

Masure a parfaitement démontré que si les composants essentiels du sol, mouillés jusqu'à saturation et exposés à l'air, laissent évaporer une très forte proportion d'eau, ils accusent encore, quand l'évaporation cesse, un degré d'humidité variant de 2 à 40 pour 100.

	POUR 100 DES DIVERS ÉLÉMENTS			
			Eau restant encore à la limite d'évaporation	
	Eau totale de saturation	Eau hygroscopique absorbée	p. 100 de l'eau totale	dans les éléments
Sable . .	19	»	2,1	11,05
Calcaire .	42	0,3	3,6	8,57
Argile . .	84	4,9	7,0	8,33
Humus . .	103	1,20	4,10	39,80

Le temps nécessaire pour atteindre la limite d'évapo-

(1) D'après les calculs effectués par différents auteurs, cette couche d'eau aurait une épaisseur inférieure à un *micron* (millième de millimètre) soit approximativement $0^m,75$.

ration spontanée est de trois jours avec le sable et l'humus, et de sept jours environ pour le calcaire et l'argile.

La quantité d'eau ainsi retenue ou fixée par les éléments est bien supérieure à celle qui correspond à l'hygroscopicité. En rapprochant ces résultats des observations faites par SACHS et HEINRICH, on peut dire *qu'il existe dans les sols, à l'état naturel, une dose limite inférieure d'humidité qui ne peut être modifiée ni par l'évaporation spontanée, ni par l'absorption radiculaire.*

L'AIR ET L'EAU DANS LE SOL. — Dans une terre récemment labourée, l'eau de pluie, au lieu de glisser à la surface, s'infiltre dans les couches profondes avec une grande facilité. A mesure que cette pénétration s'effectue, l'air se trouve déplacé et s'échappe au dehors en raison de sa moindre densité. Si le volume des espaces lacunaires reste constant pour un sol donné, d'un tassement uniforme, *les quantités d'air et d'eau sont toujours complémentaires,* ainsi que l'a démontré P.-P. DEHÉRAIN. Voici, du reste, les nombres obtenus pour six échantillons d'une même terre de Grignon prélevés après des périodes de pluie ou de sécheresse :

	EAU ET AIR DANS 100 GR. DE TERRE		
	Air	Eau	Total
a)	13,7	9	22,7
b)	7,4	16	23,5
c)	19,2	5	24,2
d)	12,0	14	26,0
e)	16,0	10	26,0
f)	21,8	4	25,8

On voit que les nombres représentant la somme

des volumes d'air et d'eau ne diffèrent pas sensiblement pour des sols en bon état de culture. En opérant sur des terres variées, humides ou sèches, les écarts sont insignifiants pour les échantillons de même nature, mais les différences s'accentuent d'une terre à l'autre.

Désignation des terres		Pour 100 de terre humide ou sèche, on trouve : Air	Eau	Total
Guadeloupe.	Humide .	7,2	19,8	27,0
	Sèche . .	18,0	9,5	27,5
Wardrecques.	Humide .	3,4	15,0	18,4
	Sèche . .	15,4	3,2	18,6
Blaringhen.	Humide .	4,9	11,5	15,4
	Sèche . .	14,3	2,9	17,2

Les façons culturales, qui influent considérablement sur la texture du sol, ont aussi pour effet de modifier les volumes respectifs de l'air et de l'eau contenus dans les espaces lacunaires. Pour suivre ces variations, dans les terres en place, DEHÉRAIN employait la *méthode des cadres ;* il a trouvé :

	Pour 100 de terre extraite : Air	Eau	Total
Compost de jardinier	41,6	27,4	69,0
Terre de jardin	38,3	25,2	63,5
Terre d'une case bien travaillée. . . .	45,0	17,2	62,2
Terre d'une case sans travail depuis 3 ans .	36,6	16,8	53,4
Terre d'une case sans travail depuis 6 ans .	33,3	15,2	48,5
Terre labourée, avant roulage	45,0	17,2	62,2
La même terre, après roulage	36,6	17,7	54,3
Terre scarifiée, hersée et roulée. . . .	30,0	18,8	48,8
La même après 2 jours de pluie . . .	20,0	20,9	40,9

Quand le sol est tassé, roulé ou non travaillé depuis longtemps, le volume de l'air et de l'eau diminue considérablement et dépasse rarement 50 p. 100. D'autres essais relatifs à des terres bien ameublies, binées ou roulées, dans lesquelles on suivait les variations de l'humidité, ont permis à Dehérain de bien mettre en lumière les bons effets du *travail du sol.*

Il conviendrait, en terminant ce long chapitre, d'insister spécialement sur les causes susceptibles de modifier les caractères physiques du sol. Or, si l'on tient compte des observations que nous avons faites, ce travail ne souffre aucune espèce de difficulté. Les propriétés physiques des terres arables, à quelques rares exceptions près, sont toutes dominées par la *texture,* qui reflète leur composition mécanique, et de laquelle dépendent les *espaces lacunaires* dont le volume variable a pour conséquence de limiter les réserves aqueuses et aériennes. Qu'on développe les espaces intergranuleux en favorisant la formation des agrégats terreux, et l'on augmentera du même coup la perméabilité, l'infiltration et la circulation de l'air et l'eau : le travail du sol, les labours et les binages produisent ainsi d'excellents effets ; les composés calciques, les amendements calcaires, qui sont des agents d'agglutination ou de coagulation, interviennent à un très haut degré et dans le même sens. Qu'on diminue l'espace vide, la porosité, par le tassement (roulage et pluie) ou par la démolition partielle des agrégats (sels alcalins, décalcarisation), et l'imperméabilité s'accroîtra considérablement.

Ainsi, la correction des propriétés physiques implique deux séries d'opérations (en dehors du drainage et de l'irrigation que d'autres circonstances rendent parfois nécessaires). Si le sol considéré n'est pas suffisamment perméable, nous viserons l'accroissement des espaces intergranuleux par des apports

de chaux, de calcaire ou de plâtre. Dans le cas contraire, si le sol est trop perméable, nous restreindrons ces grands et nombreux espaces par l'incorporation d'agents colloïdaux ou de sels alcalins pouvant être amenés à l'état de carbonates.

De part et d'autre, c'est le changement de texture surtout qui produira l'amélioration physique demandée.

II. — Propriétés chimiques.

Des transformations incessantes se produisent au sein même de la terre arable. Les matières fertilisantes qu'elle contient — tout comme celles qu'on y incorpore — y sont en perpétuelle évolution ; elles changent fréquemment de forme : soit qu'elles passent de l'*état passif* à l'*état actif*, soit qu'elles évoluent en sens inverse. Nous étudierons dans la suite — au chapitre consacré à la *Chimie du sol* — la nature et les causes de ces divers phénomènes chimiques. Pour le moment, nous limiterons notre examen à l'intéressante question des *propriétés absorbantes* qui se manifestent directement ou indirectement, suivant la nature des terrains et des substances qu'ils reçoivent.

Pouvoir absorbant. — Le sol possède, à un degré plus ou moins intense, la faculté de fixer ou d'immobiliser certains principes fertilisants. On désigne cette remarquable propriété sous le nom de *pouvoir absorbant*.

C'est un agronome italien, Joseph GAZZERI, qui découvrit ce phénomène en 1819... « Il vit qu'en

« agitant de l'au de fumier avec une terre argileuse, « celle-ci s'emparait de la matière dissoute et for- « mait avec elle une substance insoluble, mais sus- « ceptible d'être décomposée par l'action absorbante « des plantes, qui en tirent grand profit. » En 1848, HUXTABLE fit une observation semblable : il constata que le purin se décolorait et perdait toute odeur au contact de la terre. Quelques années plus tard, THOMSON, LIEBIG, WAY, BRUSTLEIN et WŒLCKER étudièrent avec le plus grand soin les propriétés absorbantes du sol à l'égard des alcalis et des sels alcalins. Elles se manifestent *directement* ou *indirectement*, suivant la nature des corps envisagés.

Avant d'aller plus loin, il importe de bien préciser les conditions expérimentales. Pour mesurer le pouvoir absorbant d'un sol donné, on agite un poids connu de terre avec une solution titrée. Cela fait, on laisse reposer et l'on prélève ensuite un certain volume du liquide clair pour en déterminer la composition chimique. Si l'analyse accuse un appauvrissement réel, on en déduit qu'il y a eu *absorption*, et l'abaissement du titre en mesure l'intensité.

Il convient de remarquer, toutefois, que l'absorption ainsi comprise comporte une *insolubilisation* chimique bien définie et une *immobilisation* moins accentuée — je dirai même passagère ou temporaire — de certaines substances. Considérons le cas spécial des phosphates solubles.

WŒLCKER a mis depuis longtemps en évidence l'absorption de ces composés, mais il ne dit pas comment ils sont fixés par le sol. Or, l'absorption de l'acide phosphorique me paraît imputable à deux causes nettement distinctes et bien différentes par leur nature :

1° Le *phosphate monocalcique* rétrograde en présence du calcaire et des composés ferriques et alumineux ; cette *rétrogradation* aboutit à la formation de *phosphate bicalcique* ($P^2O^8H^2Ca^2$) et de *phosphates de sesquioxyde ;*

2° Le phosphate monocalcique est absorbé par les ma-

tières humiques — ainsi que je le montrerai — et il se forme alors des composés spéciaux qui ne ressemblent en aucune façon aux phosphates rétrogradés proprement dits.

Dans le premier cas, le sel est décomposé, précipité et immobilisé chimiquement, suivant des lois connues ; dans le second, l'absorption est intégrale : elle porte à la fois sur l'acide et sur la base, le corps se trouve absorbé directement. De telles observations peuvent s'appliquer à d'autres substances, et c'est pourquoi nous distinguerons, à côté des cas réels d'insolubilisation, l'*absorption directe* et l'*absorption indirecte.*

a) **Absorption directe.** — L'absorption directe se manifeste surtout à l'égard des alcalis, des carbonates alcalins, des humates et des phosphates solubles. On l'observe indistinctement dans tous les sols, *même en l'absence totale de calcaire.*

1° Absorption des alcalis. — Quand on abandonne au contact de la terre une solution alcaline de richesse connue, on constate qu'elle s'appauvrit. Le sol fixe ainsi des quantités variables d'ammoniaque, de potasse et de soude. Pour une même terre, et quand on emploie des solutions de concentration différente, les quantités d'alcali absorbées croissent sensiblement. Avec l'ammoniaque, par exemple, Brustlein obtint les résultats suivants :

NATURE DES TERRES	AMMONIAQUE introduite par 100^{cc} de solution	AMMONIAQUE absorbée par 30 gr. de terre
	gram.	gram.
a) Terre de Bechelbronn. (argile-calcaire, plastique)	0,355	0,056
	0,117	0,032
	0,029	0,014
b) Terre de Liebfrauenberg. (sable quartzeux humique)	0,355	0,035
	0,117	0,026
	0,059	0,019
	0,029	0,011
c) Terre de Mittelhausbergen. (calcaire, peu plastique)	0,355	0,024
	0,117	0,017
	0,029	0,008

Ainsi, l'absorption varie bien avec la concentration des solutions, mais sans qu'il y ait toutefois une proportionnalité absolue. Croît-elle aussi avec le temps? Pour le savoir, Brustlein effectua une nouvelle série de recherches en laissant la solution ammoniacale plus longtemps au contact du sol.

Deux dosages consécutifs, exécutés après quatre heures et après quarante-huit heures, montrent que l'absorption augmente faiblement :

DÉSIGNATION DES TERRES	Ammoniaque contenue dans 100^{cc} de solution	Ammoniaque absorbée par 30 gr. de terre	
		après 4 heures	après 24 heures
	gram.	gram.	gram.
Terre de Bechelbronn	0,117	0,030	0,035
Terre de Liebfrauenberg.	0,117	0,024	0,029
Terre de Mittelhausbergen . . .	0,117	0,015	0,018

Les alcalis fixes : la *potasse* et la *soude*, sont également retenus par le sol en assez forte proportion.

Dans les terrains tourbeux, très riches en matières organiques, l'absorption des alcalis se manifeste toujours de façon intense.

2° ABSORPTION DES CARBONATES ALCALINS. — Quand DEHÉRAIN entreprit ses intéressantes recherches sur le plâtrage des terres arables, il étudia comparativement l'absorption du carbonate et du sulfate de potassium. Il obtint, avec le carbonate de potasse, après quelques heures de contact :

	POTASSE (EN GRAMMES)		
	introduite	retrouvée	absorbée
Kaolin (50 grammes) . . .	0,588	0,092	0,496
Kaolin (50 grammes) . . .	0,214	0,072	0,142
Terre de Touraine (100 gr.) .	0,100	0,000	0,100
Terre du Luxembourg (200 gr.)	0,075	0,050	0,025

La fraction de potasse absorbée pour 100 de la quantité initiale varie considérablement avec la nature des matières employées et très probablement aussi avec leur richesse initiale. Dans la terre de Touraine, l'absorption est complète; dans le sol du Luxembourg, au contraire — bien qu'on ait opéré sur une prise d'essai double (200 grammes au lieu de 100) — la proportion d'alcali absorbée atteint 0,025 : soit 33 pour 100 de celui contenu dans la solution primitive.

On doit aussi à WŒLCKER quelques essais intéressants sur l'absorption des engrais de potasse. Ce savant chimiste a démontré :

1° *Que de tous les sels potassiques, le carbonate est celui que la terre absorbe le plus facilement ;*

2° *Que les argiles, les marnes et les sols de prairie*



retiennent la potasse plus activement que les terrains légers ou sableux.

Ainsi, la fixation des carbonates alcalins est des plus manifestes. Mais ces composés sont-ils absorbés intégralement ou se produit-il un dégagement de gaz carbonique? Les expériences que nous avons effectuées confirment la seconde supposition ; il se produit toujours — même en l'absence de l'acide humique — dans la fixation des carbonates solubles par l'argile brute, un dégagement très appréciable d'acide carbonique, et cela nous permet de dire que la base seule est absorbée par le sol.

3° ABSORPTION DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE ET DU PHOSPHATE MONOCALCIQUE. — Une solution de phosphate monocalcique de titre connu s'appauvrit toujours au contact de la terre : l'acide phosphorique est donc partiellement insolubilisé. Ce fait présente un intérêt d'autant plus grand que la culture emploie d'énormes quantités de superphosphate de chaux. La consommation de cet engrais augmente chaque année, et ce n'est certainement pas sans raison que les agriculteurs lui accordent la préférence. Que devient l'acide phosphorique soluble incorporé au sol ? Est-il intégralement rétrogradé ou insolubilisé? Telles sont les questions qui s'imposent à notre examen.

Les intéressants travaux de WŒLCKER ont nettement démontré l'absorption du phosphate acide de chaux (phosphate monocalcique). Si l'on immerge un poids connu de différentes terres dans une solution titrée de phosphate monocalcique et qu'on dose ensuite, à certains intervalles, la quantité d'acide phosphorique restant en solution, on observe une décroissance continue jusqu'à ce que l'insolubilisation soit complète. En opérant avec des liquides

contenant sensiblement une partie d'acide phosphorique pour mille de terre, Wœlcker obtint les résultats suivants :

NATURE DES SOLS	Acide phosphorique absorbé pour 100 de l'acide initial.		
	après 1 jour	après 8 jours	après 26 jours
Limon rougeâtre.	60	78	95
Terrain calcaire	89	99	100
Argile compacte.	51	62	86
Sous-sol argileux	48	69	74
Terre légère.	53	59	73

C'est dans le sol calcaire que l'absorption se manifeste au plus haut degré. Viennent ensuite le limon et l'argile. Mais y a-t-il réellement *absorption* ou simplement *rétrogradation ?* Voilà ce que les expériences de Wœlcker ne permettent pas d'établir.

En m'inspirant des recherches plus récentes de M. Grandeau — lesquelles établissent l'absorption très inégale des phosphates solubles par des terres pourvues ou dépourvues de matière noire — j'ai fait une série d'expériences nouvelles pour voir comment et à quel degré les substances humiques fixent l'acide phosphorique dissous. J'ai reconnu ainsi que cette absorption se manifeste de façon très apparente dans tous les milieux riches en humus, et qu'il se forme alors des combinaisons spéciales dans lesquelles l'acide phosphorique se trouve fixé, immobilisé ou retenu sous un certain état qui lui permet d'échapper aux actions rétrogradantes, essentiellement imputables aux composés minéraux.

Dans les terres normalement constituées, la proportion de phosphate insolubilisé ou retenu n'est

jamais aussi considérable que dans les sols riches en humus. Pour s'en rendre compte, il suffit de jeter un coup d'œil sur le tableau suivant, où j'ai consigné les résultats obtenus comparativement avec le sol franc et quelques terres tourbeuses (1). Les nombres se rapportent à 50 grammes de matière et sont exprimés en grammes.

TEMPS DE CONTACT	Tourbe de Palluel	Tourbe de Brunémont	Tourbe d'Abbeville	Terre franche
2 heures	0,337	0,409	0,378	0,080
1 jour	0,430	0,488	0,465	0,085
2 jours	0,492	0,535	0,576	0,087
3 jours	0,536	0,542	0,623	0,084
4 jours	0,588	0,553	0,640	0,105
5 jours	0,600	0,565	0,658	0,133
8 jours	0,640	0,623	0,658	0,170
15 jours	0,660	0,625	0,660	0,187

On voit combien l'absorption est inégale. Tandis que la *tourbe de Brunémont* (qui dose 75,5 d'humus et 7 pour 100 de calcaire) absorbe 0 gr. 409 d'acide phosphorique — soit 50 pour 100 de l'acide total — la *terre franche,* dans les mêmes conditions, en retient seulement 0 gr. 080 : soit 10 pour 100 en chiffres ronds. C'est à la constitution des sols qu'il faut attribuer ces énormes différences ; la terre franche contient, en effet, douze fois moins d'humus et une quantité plus faible de chaux. Le rôle de la matière organique ressort donc nettement de ce premier essai. Néanmoins, comme on pourrait alléguer une disproportion dans la richesse minérale, j'ai pensé

(1) On a opéré sur 50 grammes de terre sèche et tamisée qui fut mise à digérer dans 350 cc. d'une solution de phosphate monocalcique contenant 0 gr. 815 d'acide phosphorique (en P^2O^5).

qu'il y aurait intérêt à expérimenter sur la tourbe calcinée. A cet effet, on incinéra 50 grammes de tourbe sèche; le résidu minéral obtenu pesait 8 gr. 25 pour la tourbe d'Abbeville et 12 gr. 25 pour celle de Brunémont. Les cendres furent ensuite plongées dans la solution de phosphate monocalcique. On trouva, à l'analyse, les nombres suivants :

TEMPS DE CONTACT	ACIDE PHOSPHORIQUE ABSORBÉ (EN GRAMMES)					
	TOURBE D'ABBEVILLE			TOURBE DE BRUNÉMONT		
	Tourbe	Cendres	Différences	Tourbe	Cendres	Différences
2 heures	0,378	0,166	+ 0,211	0,409	0,234	+ 0,174
1 jour	0,465	0,494	— 0,029	0,488	0,340	+ 0,148
2 jours	0,576	0,578	— 0,002	0,535	0,554	— 0,019
3 jours	0,623	0,726	— 0,103	0,542	0,604	— 0,062
4 jours	0,640	0,770	— 0,130	0,553	0,708	— 0,155
5 jours	0,658	0,788	— 0,130	0,565	0,716	— 0,151
8 jours	0,658	0,814	— 0,156	0,623	0,816	— 0,190

Ainsi, les tourbes calcinées fixent moins d'acide phosphorique, au début, que les tourbes normales. J'insisterai d'abord sur ce premier point. Il est bien manifeste, puisque les essais portent sur la même quantité d'éléments terreux, que l'excédent notable d'acide phosphorique fixé par la tourbe normale tient essentiellement à la présence de l'humus et non à la proportion de calcaire qui reste la même dans les deux cas (1). Le rôle des composés humiques apparaît ici très nettement.

Un autre fait non moins important se dégage de cette expérience. Dans la tourbe normale, l'absorp-

(1) Elle serait même plus élevée dans les cendres que dans la tourbe, en raison de la transformation de l'humate de chaux en carbonate, au cours de l'incinération.

tion du phosphate n'est pas intégrale. Même après un contact de quinze jours, il reste encore dans la solution 24 pour 100 de l'acide phosphorique initial. Au contraire, tout le phosphate est absorbé en huit jours par la tourbe incinérée. L'*humus serait-il un obstacle à la rétrogradation ?* Cela paraît vraisemblable. Le même fait se produit, d'ailleurs, avec les tourbes de Palluel et d'Abbeville. La terre franche présente aussi ce caractère, cette particularité inattendue.

L'absorption des phosphates solubles est-elle proportionnelle à la quantité d'humus ou à la dose de calcaire ? Les essais que je viens de relater prouvent péremptoirement qu'il y a un rapport étroit entre la fixation de l'acide phosphorique et l'abondance de l'humus ; mais je n'ai pu, cependant, établir de proportionnalité absolue, puisqu'il y a simultanément *absorption* et *rétrogradation*.

Visiblement, si l'humus agissait seul, c'est la tourbe d'Abbeville — la plus riche en matières organiques — qui absorberait le maximum de phosphate ; en réalité, c'est celle de Brunémont qui vient en première ligne. Il en résulte que le *coefficient d'absorption* de ces sortes de sols ne dépend pas exclusivement des doses respectives d'humus et de calcaire, mais plutôt du rapport suivant lequel ces éléments sont associés. On trouve en effet :

NATURE DES TOURBES	Rapport de l'humus au calcaire	Rapport de l'acide phosphorique absorbé à l'acide phosphorique total		
		TOURBE NORMALE	TOURBE CALCINÉE	DIFFÉRENCES
T. de Palluel . . .	3,22	41,35	32,50	8,85
T. de Brunémont .	6,05	50,18	33,62	16,56
T. d'Abbeville . . .	2,84	45,70	20,40	25,30

Ainsi, deux facteurs interviennent dans la fixation de l'acide phosphorique par la terre arable ; si on pouvait les isoler, ils agiraient l'un et l'autre dans un sens déterminé — quoique différent — en raison même de leur nature propre ; mais il y aurait proportionnalité entre les quantités de phosphate absorbé et les doses d'humus ou de calcaire. Associés ensemble, ils doivent ajouter leurs effets d'une façon très inégale, et c'est la prédominance de la matière organique sur le carbonate de chaux qui paraît régler l'*absorption* au début de l'expérience. Quoi qu'il en soit, ces essais montrent combien sont différentes l'absorption et la rétrogradation de l'acide phosphorique.

4° ABSORPTION DES HUMATES ALCALINS. — Les *humates alcalins* sont retenus par le sol, mais leur absorption n'implique pas toujours une double décomposition aboutissant à la formation d'un humate insoluble de chaux. Elle se produit même dans les terres littéralement dépourvues de calcaire, et c'est l'*argile* qui retient alors la matière humique en donnant naissance à un composé mal défini, représentant peut-être un *colloïde humo-argileux* décomposable par l'ammoniaque et par les alcalis fixes.

On s'explique ainsi comment réagit l'*eau de fumier* de GAZZERI — le purin — qui consiste essentiellement en un mélange d'humates alcalins. Mais outre la matière organique colorante, le sol retient encore assez énergiquement les principes minéraux. JUSTUS LIEBIG, le célèbre chimiste allemand, en a donné la preuve. Il a trouvé, en effet, que la terre ne fixait pas avec la même avidité la potasse et la soude contenues dans le purin.

	125cc DE PURIN DOSAIENT	
	avant filtration.	après filtration.
	gram.	gram.
Potasse	0,0867	0,0056
Soude	0,0168	0,0118

La proportion de potasse retenue est de 0,811 : soit les 93 centièmes environ, tandis que pour la soude on obtient moins de 30 pour 100.

En résumé, on voit que l'*absorption directe* se manifeste à l'égard des *humates*, des *phosphates*, des *carbonates* et des *hydrates* solubles. Le phénomène est-il de même sens pour les autres sels? Non. Et nous allons établir maintenant que toutes les terres ne fixent pas également les bases alcalines combinées aux acides sulfurique, chlorhydrique, nitrique, etc.

b) **Absorption indirecte.** — Dans ses recherches sur l'absorption de l'ammoniaque et des sels ammoniacaux, Brustlein avait été frappé de voir que le *chlorhydrate d'ammoniaque* était fortement retenu par les terres calcaires, tandis qu'il ne l'était pas par l'humus. Il supposa, dès lors, que la présence du carbonate de chaux devenait indispensable, et qu'il devait se produire, ainsi que l'avait annoncé Way, une double décomposition préalable. Sauf de rares exceptions, en ce cas, la base seule est absorbée : l'acide reste, dans la dissolution, combiné à la chaux; la décomposition du sel s'arrête à la quantité équivalente de l'alcali fixé, et la dissolution est neutre avant comme après son contact avec la terre.

Pour bien montrer l'utilité et le rôle du calcaire, il suffit d'étudier la marche de l'absorption sur un même sol avant et après traitement à l'acide chlo-

rhydrique faible qui a la propriété de décomposer le carbonate de chaux. On reconnaît ainsi que la terre traitée n'exerce plus aucune action absorbante sur les sels ammoniacaux ; mais il suffit d'y incorporer du calcaire très divisé, en l'arrosant par exemple avec une dissolution de bicarbonate de chaux, pour que les facultés absorbantes réapparaissent. Examinons maintenant comment se manifestent ces facultés à l'égard des chlorures et des sulfates alcalins.

1° Absorption des chlorures alcalins. — En étudiant la fixation du chlorhydrate d'ammoniaque par différents sols, Brustlein a constaté que ce sel est absorbé régulièrement, mais que la quantité fixée varie beaucoup avec la concentration des dissolutions :

	Dose d'ammoniaque	
	contenue dans 100 cc. de solution.	absorbée par 50 gr. de terre.
Terre de Bechelbronn	0,379	0,090
	0,038	0,020
Terre de Liebfrauenberg	0,379	0,043
	0,038	0,010
Terre de Mittelhausbergen	0,379	0,055
	0,038	0,018

D'autre part, en suivant comparativement l'absorption des chlorures de potassium et de sodium, Wœlcker a trouvé de très grandes différences. Ainsi, sur 100 parties de potasse ou de soude apportées par les solutions, il en a été retenu :

	Potasse.	Soude.
Terre calcaire	3,578	0,800
Terre argileuse	3,970	1,057
Terre sablonneuse	2,626	0,620
Terrain de pâture	3,758	1,000
Terre marneuse	3,373	0,996
Sable ferrugineux	1,475	0,620

Il résulte de ces essais que le *coefficient d'absorption* d'une même terre varie considérablement suivant la nature des bases alcalines. L'avidité du sol pour la potasse est bien plus grande que pour la soude.

2° Absorption des sulfates alcalins. — Dehérain, qui a étudié l'absorption du sulfate de potasse par le kaolin et diverses terres, a obtenu les résultats suivants :

	Potasse du sulfate (en grammes)		
	ajoutée.	retrouvée.	retenue.
Kaolin (50 gr.)	0,266	0,120	0,146
Kaolin (100 gr.)	0,470	0,307	0,163
Terre de Touraine (100 gr.). .	0,100	0,030	0,070
Terre du Luxembourg (100 gr.)	0,097	0,092	0,005

D'autres sels alcalins solubles : *silicates, phosphates*, etc., sont également fixés par le sol ; ils subissent de semblables transformations en présence des composés calciques décomposables.

Il ressort nettement de toutes ces expériences que l'absorption des bases alcalines libres ou combinées se manifeste toujours, mais à des degrés différents, suivant les conditions expérimentales. Toutefois, sauf de rares exceptions, l'absorption des sels (sulfates, chlorures, nitrates, silicates, phosphates) ne se produit qu'indirectement et partiellement ; elle implique une transformation préalable, une double décomposition aboutissant à la formation d'un carbonate ou d'un humate alcalin. Le calcaire et l'humate de chaux déterminent ordinairement cette réaction.

Puisque les bases seules sont absorbées par le sol, une autre question se pose : que deviennent les acides ? Ici, deux cas se présentent : si l'acide forme avec la chaux un composé insoluble, il restera dans

la terre ; s'il forme, au contraire, un sel soluble, il sera inévitablement entraîné par les eaux dans les couches profondes. Tel est le cas des nitrates.

On peut montrer aisément la non-absorption des acides en faisant passer des solutions alcalines de sulfates, de chlorures et de nitrates solubles sur des sols argilo-calcaires ; les eaux d'égouttage contiennent, à l'état de sels calciques, la totalité des acides primitifs. Pour les nitrates, qui sont des matières fertilisantes de première valeur, cet entraînement peut avoir de graves conséquences, et c'est dans le but de limiter ces pertes que Dehérain ne cessait de préconiser la pratique des cultures dérobées d'automne.

En résumé, il importe surtout de bien retenir :

1° *Que les alcalis, les carbonates alcalins, les phosphates et les humates solubles peuvent être directement absorbés par le sol ;*

2° *Que les bases alcalines combinées aux acides minéraux forts sont également absorbées, dans les sols calcaires, après transformation préalable des sels en carbonates ou en humates alcalins ;*

3° *Que les acides* — à l'exception de ceux qui forment des sels insolubles — *échappent au pouvoir absorbant et qu'il peut en résulter de sérieux inconvénients pour les nitrates.*

Marche de l'absorption. — Puisque le pouvoir absorbant fait obstacle à l'entraînement de certaines matières fertilisantes, il importait de rechercher dans quelle mesure se manifeste son action... Est-elle toujours plus intense dans les couches superficielles du sol ? Les principes fertilisants descendent-ils à la même profondeur ? Pour répondre à ces questions, MM. Dusserre et Biéler (de la station agronomique de Lausanne) ont étudié, sur différentes terres, l'entraînement de l'acide phosphorique et de la potasse.

La terre séchée à l'air et tamisée fut disposée en couches de 200 grammes (séparées par des rondelles de papier filtre) dans une cloche à douille. Plusieurs rondelles de papier étaient établies à la surface, et c'est sur elles que l'on versa les solutions titrées de chlorure de potassium (3 grammes) ou de superphosphate (20 grammes), puis l'eau distillée nécessaire pour imbiber la terre. Des arrosages fréquents, mais peu copieux, poursuivis pendant un mois (1), favorisaient la diffusion des engrais dans le sol. A la fin de l'expérience — le sol ayant été suffisamment lavé pour entraîner les principes non absorbés — on enleva les diverses couches de terre et l'on y dosa l'acide phosphorique et la potasse. Connaissant la richesse préalable des sols, il devenait facile de calculer leur enrichissement Les terres expérimentées, au nombre de trois, provenaient du Chalet de la Ville-sur-Lausanne (sol silico-argileux), de Praz-sur-Vevey (sol argilo-calcaire) et du Tronchet-sur-Grandvaux (sol tourbeux).

1° Essais avec le superphosphate. — Le superphosphate fut appliqué à haute dose (45 fois la fumure ordinaire) ; la solution en contenait 20 grammes correspondant à 3 grammes d'acide phosphorique anhydre (P^2O^5). Voici les résultats obtenus pour les terres expérimentées :

	Acide phosphorique dosé (en grammes)		
	Terre du Chalet	Terre de Praz	Terre du Tronchet
1re Couche.	0,9087	0,9124	0,6119
2e —	0,7781	0,8534	0,5969
3e —	0,6508	0,6439	0,5875
4e —	0,3659	0,3506	0,5236
5e —	0,1744	0,1569	0,2994
6e —	0,1048	0,0637	0,1234
7e —	0,0402	0,0070	0,1115
8e —	0,0015	»	»
Absorption totale. . .	3,0244	2,9879	2,8542
P^2O^5 non absorbé . .	0,0239	0,0039	0,0389

(1) Avec la terre du Praz, plus fortement argileuse, le temps d'arrosage et de lavage fut de sept semaines.

L'épaisseur des tranches était de 0m,016 environ ; on voit que, pour les terres du Chalet et du Praz, la presque totalité de l'acide phosphorique se retrouve sous une épaisseur de 0m,12. Avec le sol tourbeux du Tronchet, l'absorption serait moins accentuée (1). On remarquera, en prenant les tranches trois par trois (soit tous les cinq centimètres), que *les quatre cinquièmes de l'acide phosphorique sont restés dans la première zone* (exception faite pour la terre tourbeuse du Tronchet qui en retient seulement les trois cinquièmes) ; la fraction restante appartient à peu près exclusivement à la seconde zone comprise entre 0m,05 et 0m,10 de profondeur.

2° Essais avec le chlorure de potassium. — Même disposition expérimentale que celle précédemment indiquée. La solution contenait 3 grammes de chlorure de potassium correspondant à 1 gr. 847 de potasse (en K^2O). La terre tourbeuse du Tronchet n'a fixé que de très faibles quantités d'alcali : il n'en sera pas fait état.

	Potasse dosée (en grammes)	
	Terre du Chalet	Terre du Praz
1e Couche	0,337	0,353
2e —	0,334	0,302
3e —	0,315	0,276
4e —	0,256	0,204
5e —	0,220	0,189
6e —	0,137	0,165
7e —	0,070	0,143
8e —	0,058	0,108
9e —	0,049	0,075
10e —	0,038	0,025
Absorption totale	1,815	1,841
K^2O non absorbée	0,032	0,028

(1) En fait, les auteurs confondent ici l'absorption et la rétrogradation. Ils ont dosé, dans la première tranche, l'acide phosphori-

On voit manifestement que l'absorption de la potasse est toujours plus considérable dans les couches supérieures, mais cette base descend plus bas que l'acide phosphorique : elle semble donc plus mobile.

Il résulte de ces expériences que l'absorption se fait surtout dans les zones superficielles ; la potasse et l'acide phosphorique solubles, distribués à la surface de la terre, ne descendent pas au-delà d'une quinzaine de centimètres. Au point de vue pratique, une importante conclusion s'en dégage : la nécessité d'enfouir les engrais destinés à la nourriture des plantes à racines longues ou pivotantes. Cette prescription s'impose notamment pour les phosphates minéraux, à cause de la fixité de l'acide phosphorique indépendant des composés humiques. Pour les engrais potassiques, les inconvénients ne sont plus les mêmes, parce que la potasse devient *accidentellement passive :* elle forme avec l'argile et les autres colloïdes des combinaisons facilement décomposables par les eaux terrestres.

III. — Propriétés biologiques.

En ouvrant une nouvelle voie aux recherches biologiques, les grandes découvertes de PASTEUR devaient

---

que soluble dans l'acide acétique ; les nombres obtenus montrent précisément l'intensité des actions rétrogradantes :

	Terre du Chalet	Terre du Tronchet
Acide phosphorique sol. dans ac. acétique.	0,0882	0,1465
Acide phosphorique sol. dans ac. azotique.	0,8205	0,4654

donner un puissant essor à la science agronomique. De fait, une trentaine d'années ont suffi pour que nous sachions de façon précise comment les matières organiques du sol se décomposent ou s'humifient, comment les nitrates prennent naissance aux dépens de l'humus, et par quel mécanisme l'azote atmosphérique concourt à la nutrition des êtres vivants.

Aujourd'hui, rien n'est plus facile que de montrer le caractère biologique ou microbien de ces diverses transformations. Voici une terre nitrifiant bien, chauffons-la pendant quelques heures au-dessus de 100 degrés, et nous paralysons aussitôt la production de l'acide carbonique, des sels ammoniacaux et des nitrates. A cette température, la constitution chimique du sol ne subit pas de sensibles modifications ; l'activité vitale, seule, se trouve anéantie ou suspendue : les microbes sont morts, *le sol est stérilisé.* Il y a plus ! Si l'on incorpore de la délayure de terre à ce milieu stérile, où toute vie microbienne a disparu, on voit les manifestations biologiques réapparaître et reprendre bientôt leur cours normal. Un ensemencement, un apport de nouveaux ferments suffit donc pour tout remettre en état.

Ces deux genres d'épreuves : *stérilisation* et *ensemencement,* permettent ainsi de caractériser toute action microbienne. Et comme la terre est sensible à ce double traitement, nous sommes en droit d'affirmer qu'elle possède des *propriétés biologiques* réelles. Il serait difficile, dans ce court paragraphe, d'examiner en détail tout ce qui peut intéresser la microbiologie terrestre : l'humification, la nitrification, la dénitrification et la fixation de l'azote libre sont des phénomènes d'une telle importance qu'il nous semble préférable, à tous les points de vue, de consacrer un chapitre entier à l'étude des *ferments du sol.* C'est pourquoi nous bornerons notre exposé aux consi-

dérations générales concernant la *flore microbienne* de la terre arable.

Répartition des ferments. — D'innombrables êtres infiniment petits pullulent dans le sol. On en compte des centaines de mille par *gramme* de terre... M. MIQUEL en a trouvé :

Pré de Montsouris	700.000
Pré de Gennevilliers	900.000

Sur 100 *bactériacées*, il existe environ 90 *bacilles*.

D'après M. ADAMETZ, des sols argileux et siliceux des environs de Leipzig contiendraient aussi *par gramme :*

		Bactériacées.	Mucorinées.
Sol argileux	à la surface . .	500.000	50
	à 0,25	464.000	50
Sol siliceux	à la surface . .	380.000	50
	à 0,25	460.000	40

M. FRÆNKEL, qui a examiné la répartition des microbes aux différentes profondeurs d'un même sol, constate une forte diminution à partir de $1^{m},50$; au-delà de 3 mètres, les espèces microbiennes disparaissent. WARINGTON avait observé le même fait pour les *bactéries nitrifiantes*.

Ainsi, la flore bactérienne du sol s'appauvrit considérablement à mesure qu'on s'éloigne davantage de la surface. Le fait est général, et l'on peut admettre que la terre agit à la façon d'un vrai filtre qui retiendrait les microbes dans les régions superficielles.

La nature du sol, ainsi que sa couverture, exercent une grande influence sur l'abondance, la virulence et la spécificité des ferments. Les terres travaillées, qui sont soumises à une culture intensive, donnent

le plus fort contingent de bactéries ; on observe précisément le contraire dans les sols acides (sols tourbeux, sols forestiers, terres de bruyères), où les *mucorinées* remplacent les *bactériacées.* On s'explique ainsi pourquoi les ensemencements par transports de terre produisent généralement de merveilleux résultats pour la mise en valeur de ces différents terrains humifères.

Nature des ferments. — Les microorganismes du sol se groupent en bactériacées, mucorinées, schizomycètes, etc...

Parmi les principales *bactériacées*, P. Fulles distingue des *micrococcus* et des *bacilles* liquéfiant ou ne liquéfiant pas la gélatine.

a) Micrococcus ne liquéfiant pas la gélatine : *M. aurantiacus, M. candidus*, *M. candicans*, *M. luteus*, *M. versicolor*, etc...

b) Micrococcus liquéfiant la gélatine : *Diplococcus luteus*, *Sarcina lutea*, etc.

c) Bacilles ne liquéfiant pas la gélatine : *B. fluorescens*, *B. muscoïdes*, *B. diffusus*, *B. filiformis*, *B. luteus*, *B. viridis*, etc.

d) Bacilles liquéfiant la gélatine : *B. racemosus, B. mycoides*, *B. mesentericus*, *B. subtilis, B. prodigiosus*, et divers *Proteus*, etc...

On peut citer encore d'autres bacilles pathogènes ou non pathogènes : *Bacillus butylicus*, *Bac. racemosus*, *thermophilus, viscosus*, et différents *Staphylocoques* et *Streptocoques.*

Il convient de signaler, parmi les *Mucorinées,* les divers *Penicilliums*, *Mucors* et *Aspergillus ;* parmi les *levures,* les *Saccharomyces ellipsoidus*, *cerivisiæ* et *glutinis,* ainsi que le *Molinia candida.*

Tous ces microbes, qui sont loin d'être toujours aussi abondamment répandus, ne présentent pas le même intérêt au point de vue agricole. A côté des

bactéries pathogènes — trop souvent pernicieuses — on rencontre une légion d'espèces banales dont le rôle est encore obscur et imprécis. Dans ce travail, nous ne retiendrons que les espèces utiles, mais en ayant soin de faire remarquer que plusieurs d'entre elles deviennent parfois nuisibles : tel est le cas des *ferments dénitrificateurs.*

Sous le rapport du *modus vivendi,* il y aurait lieu de distinguer : les *microbes aérobies,* qui utilisent directement l'oxygène aérien, et les *microbes anaérobies,* qui travaillent en l'absence de l'air. Ces derniers empruntent l'oxygène aux composés oxygénés, organiques ou minéraux, qu'ils réduisent parfois énergiquement, ce qui leur a valu le nom de *ferments réducteurs,* par opposition à celui de *ferments oxydants,* parfois appliqué aux *aérobies.*

Rôle des ferments. — C'est à l'intensité des *actions biologiques* et à la constitution physico-chimique du sol qu'il faut subordonner la notion de fertilité. Une *terre morte* ou dépourvue de toute activité microbienne ne pourrait être cultivée économiquement ; elle est comparable à ces sols artificiels dont les matériaux sont frappés d'inertie ou de passivité, et sur lesquels nos plantes de grande culture refusent de se développer normalement en l'absence des solutions nutritives. Les belles expériences de Duclaux l'ont péremptoirement établi.

Des cultures comparatives faites dans le même terrain, stérilisé ou non stérilisé, offrent un contraste frappant : en milieu stérile, la végétation reste chétive et misérable, le développement de la plante est anormal et très irrégulier (1). On observe précisé-

(1) Cette assertion n'est vraie que pour les sols ordinaires ou de moyenne fertilité. Nous avons observé, en effet, que, dans les

ment le contraire dans la terre naturelle. Il suit de là que *les bons ferments du sol sont les précieux auxiliaires de la production végétale*. Et l'obtention des grands rendements pourrait bien dépendre, en partie du moins, des moyens employés pour exalter le plus possible la virulence ou l'activité de ces infiniment petits bienfaisants.

Le sol arable est l'habitat ou le réceptacle naturel de tout un monde microbien. Par sa porosité, par sa nature et sa constitution, il se prête admirablement à la réception des germes : à sa surface, les *aérobies* trouvent des conditions parfaites d'évolution ; plus bas, un peu plus loin de l'atmosphère gênante, les *anaérobies* jouissent d'une douce quiétude. Et les uns et les autres cheminent à loisir, par voie d'eau, autour des particules terreuses riches en substances organiques qui leur fournissent à la fois un support stable et des aliments copieux.

Comme tous les êtres vivants, les microbes ne travaillent bien que dans certaines conditions : ils sont très sensibles au surmenage, au froid et à la grande chaleur, à l'humidité et à la sécheresse, à l'acidité et à l'alcalinité du milieu, etc. La *fatigue du sol* est imputable, généralement, à un défaut d'activité microbienne : elle se manifeste même dans les terrains riches soumis à des cultures intensives et répétées (sols maraîchers). Pour les ferments dégradateurs de matières humiques — qui sont les plus intéressants en agriculture — les limites de température oscillent de 8 à 40 degrés environ ; le degré d'humidité minimum serait de 8 à 10 pour 100 ; ils supportent difficilement l'acidité et l'alcalinité au-delà de quelques

---

terrains riches en matière noire et en humophosphates, la stérilisation n'a pas d'influence marquée sur le développement des récoltes, même s'il s'agit des légumineuses cultivées.

millièmes ; enfin, étant donné que la plupart sont aérobies, l'aération du sol exalte considérablement leurs facultés biologiques, comme nous le montrerons plus loin (voir nitrification).

Cela dit, nous allons examiner plus spécialement les divers processus de la *dégradation* ou *minéralisation* de l'humus, de la *dénitrification* et de la *sidération* ou fixation de l'azote atmosphérique.

V

LES FERMENTS DU SOL

Puisque la terre arable est quelque chose de vivant — selon la juste expression de M. Berthelot — il importe de savoir comment et par quoi elle vit. A la vérité, la plupart des éléments du sol sont inertes comme la matière brute qui les constitue ; et s'ils prennent une apparence de vitalité, c'est en raison des innombrables ferments auxquels ils servent ou de support ou d'aliments.

Nous avons établi précédemment :

1° Que le sol végétal est le siège d'actions biologiques plus ou moins intenses ;

2° Que les ferments s'y répartissent très inégalement suivant la profondeur ;

3° Que les espèces microbiennes y sont nombreuses et variées.

Cela ne suffit pas. Il faut que nous connaissions la nature et le sens des diverses actions biologiques qui intéressent plus spécialement la chimie agricole.

Un cycle merveilleux s'offre à notre examen : c'est le cycle évolutif de l'azote. La partie organique de la matière végétale représente le plus généralement une association de composés hydrocarbonés et de substances albuminoïdes ou protéiques qui se consument lentement dans le sol et donnent naissance à l'humus. Cette première phase — *phase d'humification* — a pour objet la libération des matières azotées

(qu'elle ne réalise que très imparfaitement d'ailleurs) et pour caractère essentiel la dégradation des principes ternaires ou des hydrates de carbone. La matière azotée, débarrassée de la gangue celluloso-pectique qui l'emprisonnait, entre désormais dans la *phase de minéralisation :* elle va nitrifier, et l'azote qui s'y trouve contenu passera successivement — suivant en cela l'ordre le plus naturel — à l'état *ammoniacal*, à l'état *nitreux* et à l'état *nitrique*. Les nitrates utilisés par la végétation sont fatalement réduits, après un certain temps, et l'azote libre s'échappe dans l'atmosphère. Sera-ce tout ? Non. Une partie de l'azote atmosphérique fera bientôt retour à la végétation par l'intermédiaire des infiniment petits qui vivent en symbiose avec d'autres espèces. Et le cycle recommence ainsi indéfiniment, toujours avec les mêmes étapes ou les mêmes phases : *humification, ammonisation, nitrosation, nitratation, dénitrification, sidération.* — Cette importante question, on le voit apparemment, est un des côtés essentiels de la microbiologie agrologique.

Au lieu d'envisager les manifestations microbiennes en suivant un ordre conforme à la classification morphologique, il nous semble préférable de nous en tenir à la succession naturelle des phases en distinguant :

1° les ferments humificateurs,
2° les ferments nitrificateurs,
3° les ferments dénitrificateurs,
4° les ferments fixateurs d'azote.

Tous ces agents, d'une manière générale, sont producteurs d'acide carbonique. Ce gaz provient alors : soit de la respiration (combustion lente interne), soit de l'oxydation ou de la réduction des matières organiques.

I. — Ferments humificateurs.

La formation de l'humus — *l'humification* — est le résultat d'actions biologiques diverses. Dans les sols régulièrement cultivés, qui subissent tous les ans plusieurs façons aratoires, les matières organiques se décomposent progressivement, par voie d'*érémacausis,* et le travail du sol qui désagrège, effrite, triture les particules terreuses, a pour effet de favoriser au plus haut degré l'action des *ferments oxydants.* Au contraire, dans les milieux humides et marécageux, où l'oxygène de l'air pénètre difficilement, les matières végétales se putréfient, et c'est aux *ferments réducteurs* surtout qu'incombe le travail d'humification. Le plus souvent, dans les terrains ordinaires, ces diverses actions se manifestent simultanément.

Quel que soit le processus dominant — qu'il y ait *érémacausis* ou *putréfaction* — les mêmes composés disparaissent inévitablement, et il ne reste de la masse végétale, en fin de compte, qu'un résidu de *vasculose* et de *matières protéiques* plus ou moins altérées représentant l'humus brut. Les *hydrates de carbone :* gommes, sucres, dextrines, amidon, cellulose, ont été transformés en composés gazeux ou volatils parmi lesquels dominent l'*acide carbonique,* l'*eau* et le *méthane.*

Dégradation des matières ternaires. — Les microbes qui participent à l'humification sont très nombreux. La plupart des *espèces banales,* si les conditions de milieu s'y prêtent, concourent à la dégradation des matières ternaires ; il en est même qui peuvent agir à la fois sur les hydrates de carbone et sur les substances protéiques.

Quand on étudie comparativement la marche de la transformation des composés hydrocarbonés, on est frappé de voir combien elle est inégale d'une espèce à l'autre. Ce sont les matières solubles : sucres réducteurs, dextrines, tanins, qui disparaissent le plus rapidement. Viennent ensuite les substances amylacées, la gomme de paille et la cellulose.

En ensemençant avec du fumier de la paille finement hachée, additionnée d'une solution nutritive minérale, M. A. Hébert (1) a obtenu les pertes suivantes pour 100 des différents principes :

	Perte.
Cellulose	56,2
Gomme de paille	53,3
Vasculose	16,1

Les matières grasses ne sont pas réduites directement. Elles sont d'abord oxydées et saponifiées : la glycérine et les acides gras, mis en liberté par la saponification, deviennent la proie des microbes qui les réduisent avec plus ou moins de rapidité.

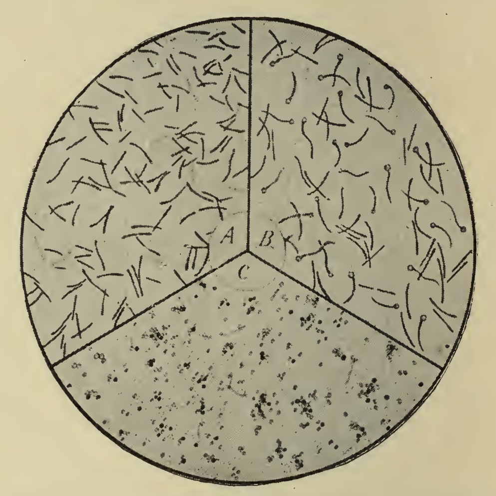
Fermentation cellulosique. — La fermentation cellulosique a déjà fait l'objet de nombreux travaux. Suivant la nature des milieux et la spécificité des microbes, elle peut s'opérer en présence ou en l'absence de l'air.

1° Processus aérobien. — Les agents susceptibles de décomposer la cellulose, en milieu aéré, sont des moisissures vulgaires ou des microbes spéciaux. Le *Mucor stolonifer,* le *Botritis vulgaris*, le *Cladosporium herbarum,* la *Peziza libertiana,* etc., détruisent aisément ce corps en présence d'une solution nutritive de phosphate acide de potasse, de nitrate d'ammoniaque et de sulfate de magnésie.

(1) *Annales agronomiques*, t. XVIII, p. 356.

Dans les milieux neutres ou très légèrement alcalins, ce sont les *microbes aérobies* qui entrent surtout en jeu. On remarque, parmi les plus actifs, les ferments *nitrificateurs*. A citer également : le *Bacillus ferrugineus,* qui vit en symbiose avec une espèce de *Micrococcus* et qui forme des taches de rouille sur le papier suédois servant à la culture.

2° PROCESSUS ANAÉROBIEN. — Ce processus est caractérisé par la production constante du méthane ou gaz des marais, de l'acide carbonique, et parfois de l'hydrogène. Les recherches effectuées par M. OMÉLIANSKY, sur des cultures pures, permettent d'établir que la *fermentation forménique* et la *fermentation hydrique* de



F.G. 14. — *Ferments de la cellulose* aux différents stades (grossis 800 fois). A. microbe jeune ; B. microbe adulte (formes en baguettes de tambour); C. sporulation.

la cellulose sont l'œuvre de microbes spécifiques différents qui se présentent, au microscope, sous forme de bâtonnets, droits ou coudés, colorables par le violet de gentiane et la fuchsine (fig. 14).

La composition des gaz obtenus dans les transformations précédentes accuse de sensibles différences. Voici, du reste, le bilan complet de deux fermentations.

	Fermentation forménique.	Fermentation hydrique.
	Gram.	Gram.
Cellulose introduite	2,0815	3,4723
Cellulose disparue	2,0065	3,3451
Produits formés :		
Acide carbonique	0,8678	0,9722
Méthane	0,1372	»
Hydrogène	»	0,0138
Acides divers	1,0223	0,2402

Parmi les acides divers figurent, en rapports parfois très inégaux, l'acide acétique et l'acide butyrique ; on suppose que ces produits servent d'aliments aux ferments de la cellulose qui ont été isolés par M. Oméliansky dans des cultures sur *papier suédois* imprégné d'une solution nutritive minérale.

Le *Bacillus Amylobacter* peut aussi dégrader la cellulose. Son action est utilisée pour le rouissage du lin. Il agit principalement sur les *matières pectiques ;* il se forme de l'acide carbonique, de l'hydrogène et des acides gras. Les amylobacters attaquent les hydrates de carbone dans l'ordre suivant : matières sucrées, composés pectiques, cellulose.

Les *ferments dénitrificateurs,* ainsi que l'ont observé successivement M. Mensel et M. Iterson, décomposent aussi les principes cellulosiques en présence des nitrates (1). Il semble même que la transformation soit bien plus active. On ne recueille, en ce cas, comme produits gazeux, que de l'acide carbonique et de l'azote.

(1) La réaction peut se traduire ainsi :

$5(C^6H^{10}O^5)+24(AzO^3K)=24(CO^3HK)+6(CO^2)+12(Az^2)+13\ (H^2O)$.

On aurait de même avec le nitrite de potassium :

$(C^6H^{10}O^5)+8\ AzO^2K)=4(CO^3HK)+2(CO^3K^2)+4(Az^2)+3(H^2O)$.

D'autres ferments, encore peu étudiés, contribuent vraisemblablement à la formation de l'humus. Nos connaissances sur ce point ne peuvent que s'étendre. En tout cas, quels que soient les processus de décomposition et le degré d'activité ou de virulence des micro-organismes, nous savons maintenant que les matières hydrocarbonées se transforment toujours avec production finale d'acide carbonique et d'eau. Le grand travail de l'humification se trouve ainsi caractérisé, d'un côté, par l'obtention d'un résidu organique altéré, considérablement plus riche en azote que les débris végétaux originels : c'est l'*humus* proprement dit ; de l'autre, par un dégagement constant de composés gazeux où l'acide carbonique domine.

Dégradation des matières azotées. — Pendant l'humification — ainsi que l'a reconnu M. Kostytchef — il ne se produit aucune perte sensible d'azote. Seules les matières hydrocarbonées se détruisent avec plus ou moins de rapidité, et cette dégradation lente libère en partie les substances albuminoïdes. Ces matières conservent-elles intégralement leur nature primitive ? Ont-elles subi, au contraire, un commencement de transformation ? A la vérité, il semble rationnel d'admettre que les actions biologiques se manifestent à la fois, mais avec des intensités bien différentes, sur les principes immédiats ternaires et quaternaires. Au cours de la dégradation, la molécule complexe des albumines végétales doit être partiellement décomposée avec formation de principes *aminés, amidés* et *alcalamidés,* ainsi qu'en témoigne la constitution chimique de l'humus brut tourbeux. D'autre part, il est probable que certaines substances ternaires s'enrichissent en azote, et la *vasculose* change ainsi de nature. Il devient alors difficile, dans

les conditions ordinaires, de faire la part exacte des choses et de dire si les matières azotées moins résistantes que nous trouvons dans l'humus normal, proviennent exclusivement des protéides originels.

Toutefois, dans la fermentation du fumier, au cours de l'humification, on observe une dégradation réelle. P.-P. Dehérain et Ch. Dupont (1) ont démontré expérimentalement que le *B. mesentericus ruber*, réducteur de la gomme de paille, disloque la *légumine* avec production d'ammoniaque, parfois même d'azote libre, tandis que le *B. termophylles grignoni* dégrade cette matière azotée en la laissant à l'état d'amide. Bien que les conditions d'activité du sol et du fumier ne soient guère comparables, ni sous le rapport du milieu, ni sous le rapport des températures, il ne s'ensuit pas que les composés azotés de l'humus brut y demeurent absolument intacts. Au reste, ceux-ci se dégradent par la suite, comme on va le voir, sous l'influence des agents de la nitrification. Dès lors, rien ne nous empêche de supposer que les premières dislocations (dégradation à l'état d'amides plus ou moins complexes) ne soient l'œuvre de certains microbes humificateurs habitant le sol.

II. — Ferments nitrificateurs.

Quand le travail d'humification est à peu près terminé, les matières azotées de l'humus deviennent la proie des *ferments nitrificateurs*. Elles entrent alors dans la phase de minéralisation, qui comporte trois ordres de phénomènes distincts : l'*ammonisation*, la *nitrosation*, la *nitratation*.

---

(1) Dehérain : *Traité de chimie agricole*, p. 782.

Entre les métamorphoses extrêmes, nous rencontrons invariablement les mêmes états de transformation. A la fermentation ammoniacale succèdent les fermentations nitreuse et nitrique. Chacune de ces phases étant placée sous la dépendance de celle qui la précède immédiatement, il est impossible d'en excepter une sans paralyser les autres, sans enrayer la marche normale de la *nitrification* (1) qui symbolise, à nos yeux, *la série des métamorphoses que doivent subir les matières organiques azotées pour passer à la forme nitrique.* En somme, dans ce cycle merveilleux, toutes les étapes sont marquées au passage par le corps évolutif qui va d'un état à l'autre sans jamais en sauter deux à la fois.

Cette étroite subordination ressort manifestement des expériences faites par M. Oméliansky (*Archives des Sciences biologiques russes,* année 1899).

Les ferments nitreux et nitriques agissent-ils directement sur les matières azotées du sol avec ou sans formation intermédiaire d'azote ammoniacal? Ont-ils, au contraire, un rôle spécifique propre? La question étant ainsi posée, M. Omélansky essaya de la résoudre en cultivant des ferments nitreux et nitriques purs dans des liquides stérilisés contenant de l'urée, de l'asparagine, du blanc d'œuf, de l'urine, etc., incorporés à un milieu minéral exempt de sels ammoniacaux et de nitrites; il ne se produisit aucune transformation, ce qui montre bien que l'azote organique, quelle que soit sa forme, ne subit pas l'action oxydante de ces microbes en l'absence

(1) Nous donnons ici au mot *nitrification* la plus grande extension de sens. Nous ne considérons pas seulement la transformation des sels ammoniacaux en nitrates — ce qui impliquerait la séparation de l'ammonisation — nous envisageons au contraire toutes les phases de la dégradation des substances organiques azotées.

des ferments producteurs d'ammoniaque. Si l'on opère en présence du *Bacillus racemosus*, capable de dégrader l'azote organique, les conditions expérimentales ne sont plus semblables et les résultats obtenus sont tout différents : le liquide se putréfie et l'ammoniaque apparaît. Dès lors, les autres ferments entrant en jeu, il se forme des *nitrites* et des *nitrates*.

En répétant ces différents essais, avec des mélanges de *Bacillus racemosus* et de *nitrosomonas* (ferment nitreux), on voit se former de l'ammoniaque et des nitrites, mais pas de nitrates. L'association du *Bacillus racemosus* et des *nitrobactéries* (ferment nitrique) ne donne lieu qu'à la production exclusive de composés ammoniacaux.

Il résulte de ces belles expériences que la transformation des matières organiques azotées constitue un remarquable exemple de *métabiose*, c'est-à-dire un cycle de métamorphoses successives dans lequel les produits d'activité d'un microbe servent de matériaux pour le travail des autres.

Fermentation ammoniacale. — La production de l'ammoniaque — *l'ammonisation* — est surtout l'œuvre de ferments oxydants et hydratants. A côté d'eux, on trouve encore des moisissures banales : *Aspergillus*, *Mucor racemosus*, *Fusarium Müntzii*, etc.

Parmi les microbes de l'ammonisation, nous citerons, d'après M. E. Marchal (1) : les *Bacillus mycoïdes* (fig. 15), *arborescens*, *mesentericus*, *liquefaciens* et *fluorescens*, le *Bacterium coli*, le *Proteus vulgaris* et différents *Micrococcus* susceptibles, comme le ferment de l'urée, d'hydrolyser les corps amidés.

---

(1) *Annales agronomiques*, t. XIX, p. 506.

Par quel mécanisme les matières azotées de l'humus donnent-elles naissance aux composés ammoniacaux ? Il semble naturel d'admettre que les substances albuminoïdes ou protéiques se dégradent progressivement et passent à l'état d'amides com-



FIG. 15. — *Bacillus mycoïdes.* A) jeune ; B) sporulé.

plexes de la forme R. $CO.AzH^2$, lesquels engendrent ensuite, par simple hydratation, les sels ammoniacaux correspondants. Je suppose que ceux-ci sont oxydés, puis transformés en carbonate d'ammoniaque (1). Ce nouveau corps peut nitrifier directement

(1) Les réactions seraient alors semblables à celles-ci :

a) *Avec les amines :*

$$\underbrace{2(CH^3AzH^2)}_{\text{methylamine}} + 6O = \underbrace{CO^3(AzH^4)^2}_{\text{carb. d'amm.}} + CO^2 + H^2O.$$

b) *Avec les amides :*

$$\underbrace{2(CH^3COAzH^2)}_{\text{acétamide.}} + 8O = \underbrace{CO^3(AzH^4)^2}_{\text{carb. d'amm.}} + 3CO^2 + H^2O.$$

ou réagir sur l'acide humique et former un *humate* très facilement nitrifiable. La nécessité d'une oxydation subséquente ne fait pas l'ombre d'un doute, puisque l'ammonisation est arrêtée par suite du défaut d'oxygène.

Pour bien montrer le caractère microbien de la formation de l'ammoniaque, il suffit d'étudier comparativement la marche de ce phénomène dans une même terre stérilisée ou non stérilisée. MM. Muntz et Coudon (1), en opérant sur un sol contenant 3,5 de calcaire et 20 °/ₒ d'eau — ayant reçu 1 gramme de sang desséché — ont obtenu les quantités suivantes d'ammoniaque :

	Ammoniaque (en milligr.) dans 100 gr. de terre.	
	Stérilisée.	Normale.
Au début	3,6	1,7
Après 42 jours. . . .	3,5	19,8
Après 105 jours . . .	3,3	52,1

On voit que l'échantillon stérilisé n'accuse aucun gain d'ammoniaque. Et si la proportion d'alcali est un peu supérieure au début, c'est en raison de l'attaque des matières azotées qui se produit toujours, ainsi que M. Hébert (2) l'a reconnu, quand on expose la terre à des températures comprises entre 100 et 150 degrés. Par contre, dans le sol normal ou non stérilisé, l'ammonisation se manifeste avec intensité ; elle devient encore plus rapide si l'on renouvelle l'air ambiant au cours de l'expérience :

(1) *Annales agronomiques*, t. XIX, p. 209.
(2) Même revue, t. XV, p. 335.

	Ammoniaque formée (en milligr.) dans 100 gr. de terre ayant reçu 0 gr. 18 d'azote du sang.	
	Au début	Après 67 jours.
a) *Terre de Champagne.*		
Stérilisée à 120°. . . .	18,7	14,2
Non stérilisée (air renouvelé).	17,3	128,3
Non stérilisée (air confiné). .	17,2	92,9
b) *Terre du Limousin*		
Stérilisée à 120°	46,4	45,8
Non stérilisée (air renouvelé).	43,4	85,3
Non stérilisée (air confiné). .	43,4	76,8

La formation de l'ammoniaque devient très apparente dans les terres humifères auxquelles on ajoute des doses croissantes de carbonate de potasse ; en moins de huit jours, il se produit une quantité appréciable d'alcali, et le liquide d'épuisement, traité par le réactif de Nessler, donne un précipité rouge fort abondant caractéristique des sels ammoniacaux.

A titre d'exemple, voici les résultats que j'ai obtenus avec une tourbe des environs d'Abbeville :

Carbonate de potasse p. 100	Azote ammoniacal (en milligr.) formé dans 100 gr. de tourbe humide après		
	2 jours.	5 jours.	8 jours.
0,3	7,60	8,4	15,2
0,5	8,64	10,0	16,0
0,8	11,88	14,0	17,6
1,0	15,20	16,8	17,6

M. Bréal, qui a étudié la production de l'ammoniaque dans des infusions de feuilles de trèfle envahies par des Colpidiums, reconnaît que la réaction alcaline acquise par le milieu devient bientôt mortelle pour les infusoires ; mais on peut maintenir vivants

ces organismes en plongeant dans le liquide un cristal de *bitartrate de potasse* qui neutralise l'ammoniaque formé (1).

Au sein de la terre, où abondent l'acide humique et le gaz carbonique, l'alcalinité n'est pas à craindre, et l'ammonisation se produit normalement, à moins que le milieu, trop chargé d'humus et trop pauvre en bactéries, ne se montre naturellement réfractaire aux actions microbiennes.

Fermentation nitreuse. — Dès que les ferments ammoniacaux ont commencé le travail de minéralisation, les *ferments nitreux* — agents essentiels de la *nitrosation* — manifestent leur activité biologique. Ces organismes ont été isolés par M. Winogradsky, et nous connaissons aujourd'hui leur mode d'action ainsi que les conditions nécessaires à leur développement. Ils ont pour mission de transformer l'ammoniaque en acide nitreux ou les sels ammoniacaux en nitrites (2).

On cultive ces ferments dans une solution essentiellement minérale contenant du sulfate d'ammoniaque, du phosphate de potasse, un peu de sel, des traces de sulfate ferreux et du carbonate de magnésie ; ils sont de forme ovale ou presque sphérique (*nitrosococcus,* fig. 16) et plus gros que la nitrobactérie. Certaines espèces ont des cils vibratiles apparents et parfois très longs (*nitrosomonas,* fig. 17) ; ils assimilent le carbone des carbonates et trouvent dans l'oxydation de l'ammoniaque l'énergie nécessaire à la décomposition de l'acide carbonique ; ils transfor-

---

(1) *Annales agronomiques*, t. XXII, p. 362.

(2) L'oxydation de l'ammoniaque peut se représenter ainsi :

$$AzH^3 + 3O = AzO.OH + H^2O$$

ment enfin, d'après MM. Boullanger et Massol (1), tous les composés ammoniacaux : arséniate, azotate, azotite, borate, carbonate, hyposulfite, sulfite, sulfate, phosphate, sulfure, chlorure, bromure, fluorure, acétate, formiate, lactate, succinate et urate ; mais ils n'agissent pas sur les sels d'hydroxylamine.

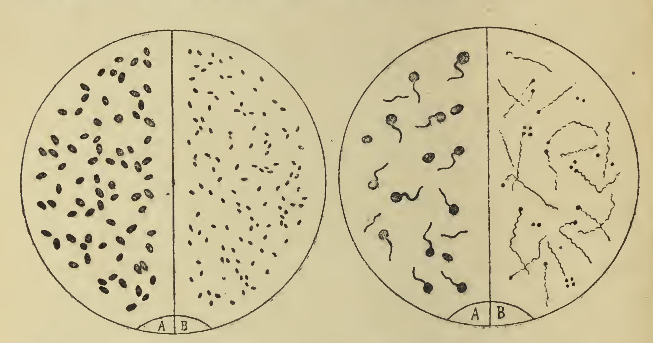


Fig. 16. — *Nitrosococcus* : A) de Zurich ; B) de Kazan.

Fig. 17. — *Nitrosomonas* : A) de Zurich ; B) de Java.

M. E. Demoussy, qui a étudié la nitrification des *amines* ou *ammoniaques composées*, reconnaît que ces bases organiques résistent d'autant mieux à l'action des ferments qu'elles sont plus riches en carbone (2).

Culture des ferments nitreux. — Pour obtenir des cultures pures de nitrosococcus et de nitrosomonas, on peut employer, comme support, la *silice gélatineuse* (3)

(1) *Annales de l'Institut Pasteur* (année 1904).

(2) *Annales agronomiques*, t. XXV, p. 232.

(3) Pour préparer la silice gélatineuse, Omeliansky mélange des volumes égaux de silicate de potasse (densité 1,06) et d'acide chlorhydrique (densité 1,10). On verse peu à peu le silicate dans

(OMÉLIANSKY), la *gélose* purifiée par des macérations dans l'eau (BÉYERINCK) ou même des plaques de gypse et de magnésie. Il suffit d'incorporer ensuite à l'une ou l'autre de ces substances une solution nutritive contenant par litre :

Sulfate d'ammoniaque	2 gr.
Chlorure de sodium	1 ou 2 gr.
Phosphate de potasse	1 gr.
Sulfate de magnésie.	0,5
Sulfate de fer	0,4

Après stérilisation, on répartit le liquide (à raison de 50 cc.) dans des fioles coniques et l'on ajoute 0 gr. 5 de carbonate de magnésie stérilisé. On peut aussi, à l'instar de MM. BOULLANGER et MASSOL, verser la solution dans des petits tonnelets remplis de scories facilitant l'accès de l'air. Quelle que soit la méthode suivie, il faut ensemencer avec de la délayure de terre ou des liquides provenant de cultures antérieures.

Quand l'ammoniaque est complètement transformée — lorsque la solution ne donne plus de coloration ou de précipité rouge avec le *réactif de Nessler* — on prélève une goutte de cette première culture pour ensemencer de nouveaux vases (1). Après trois ou quatre opérations semblables, la culture est assez pure, et l'on peut isoler le ferment. Un examen microscopique permet de vérifier le degré de pureté.

Quel est le rôle des diverses substances contenues dans la solution nutritive ? En dehors du sel ammoniacal, dont l'azote sera transformé en acide nitreux, nous avons comme matières actives : l'air, le phosphate de potasse, le carbonate magnésien. Le sulfate de fer ne semble pas

---

l'acide afin d'éviter la coagulation prématurée de la silice, puis on dialyse jusqu'à disparition du chlorure et on lave plusieurs fois à l'eau distillée après 24 heures de contact.

(1) Au début de la culture, il se forme des amas gélatineux de microbes — des *zooglées*. C'est à la fin seulement, quand les ferments sont disséminés dans le liquide légèrement trouble, qu'il faut prendre la semence.

intervenir dans l'oxydation : il doit agir vraisemblablement comme stimulant. Le rôle du carbonate, au contraire, est de toute première importance. Non seulement ce corps apporte une base salifiable — la magnésie — permettant la transformation de l'acide nitreux en nitrite, mais il peut fournir au microbe du carbone alimentaire.

Le ferment nitreux, en effet, bien que dépourvu de chlorophylle, assimile directement l'acide carbonique à l'instar des plantes vertes.

Toutefois, si l'on s'en rapporte aux essais de M. Godlewski (1), ce n'est pas au carbonate que le microbe emprunterait le carbone, mais à l'air atmosphérique. En faisant des cultures en milieu confiné, avec des solutions contenant, par litre, 2 gr. 5 de sulfate d'ammoniaque et 10 grammes de carbonate basique de magnésie — en présence de l'air pur ou chargé d'acide carbonique (4 et 6 pour 100) — on observe de très sensibles différences à l'analyse : en l'absence d'acide carbonique (air purifié), le volume gazeux reste constant pendant six mois, et la solution ne renferme aucune trace de nitrites et de nitrates ; avec de l'air chargé de 4 pour 100 d'acide carbonique, on trouve, au contraire, après quatre mois, une réduction de volume de 125 cc., et l'analyse des gaz accuse :

Acide carbonique disparu	12 cc.
Oxygène disparu	117 cc. 03
Azote apparu.	0 cc. 83

Or, si l'on calcule la quantité d'oxygène strictement nécessaire pour transformer 0 gr. 0484 d'azote ammoniacal en acide azoteux, on trouve 0 gr. 1654 d'oxygène. D'autre part, pour former les 0 gr. 0011 d'azote gazeux (correspondant aux 0 cc. 83 d'azote apparu), il a fallu encore 0 gr. 0043 d'oxygène. Soit une consommation totale de 0 gr. 1697 d'oxygène, très sensiblement équivalente au volume disparu : les 117 cc. 03 pesant 0 gr. 1673.

M. Godlewski conclut de là : *que le ferment nitreux emprunte le carbone à l'acide carbonique libre et non au*

(1) *Annales agronomiques*, t. XXVI, p. 309.

carbonate. Il se peut qu'il en soit ainsi, dans le sol, où l'atmosphère est riche en acide carbonique; nous pensons néanmoins que, dans les bouillons de culture, le carbonate intervient indirectement par la mise en liberté de son acide, lors de la formation des nitrites, quand la fermentation est amorcée.

Fermentation nitrique. — La *nitrobactérie* oxyde les nitrites et les transforme en *nitrates* (1); elle est ainsi l'agent de la *nitratation.* Cet important phénomène pourrait même se produire spontanément, par voie chimique, en raison de l'instabilité des composés nitreux (A. MÜNTZ). Les caractères biologiques et morphologiques de la monade nitrique sont encore moins bien connus que ceux des ferments nitreux. M. WINODGRADSKY a décrit un organisme spécial — formé de très petits bâtonnets anguleux et irréguliers — qui transforme les azotites en azotates et n'oxyde pas l'ammoniaque : ce serait le véritable ferment nitrique (2).

Culture du ferment nitrique. — On ne connaît bien qu'une seule nitrobactérie : celle que M. WINODGRADSKY a isolée, en 1891, d'une terre de Quito. Il est possible de la cultiver sur la silice gélatineuse, mais la gélose semble préférable. Les méthodes employées sont identiques à celles précédemment décrites : la solution nutritive, quelque peu différente, contient par litre :

Nitrite alcalin	2 gr.
Carbonate de soude calciné	1 gr.
Phosphate de potasse	0,5
Gélose	15 gr.

(1) La réaction est des plus simples :

$$\underbrace{AzO\text{-}OH}_{\text{ac. nitreux.}} + O = \underbrace{AzO^2OH}_{\text{ac. nitrique.}}$$

(1) C. R. de l'Académie des sciences, t. CXIII, p. 89.

Quand les colonies sont bien pures, le bouillon ordinaire doit rester stérile après ensemencement.

Quel est le rôle du carbonate alcalin contenu dans la solution nutritive ? Nous savons que, dans la fermentation nitreuse, ce corps sert à la saturation de l'acide nitreux ; mais, ici, son action est-elle semblable ? Rien ne permet de le supposer ; et cependant l'expérience montre que sans carbonate de soude, dans une atmosphère privée ou non d'acide carbonique, le nitrite persiste indéfiniment. Il suit de là que le carbonate est indispensable. Néanmoins, l'influence de ce corps demeure imprécise, puisque le ferment, d'après Winodgradsky, prend le carbone à l'atmosphère. On sait seulement que ce sel agit très efficacement à la dose d'un millième.

Les sels ammoniacaux, même en faible quantité, paralysent la nitratation ; les nitrites sont également préjudiciables à partir de 1 pour 100. Parmi les matières organiques, la glycérine, l'asparagine, la peptone et l'urine (à cause de l'ammoniaque) ralentissent considérablement l'oxydation des nitrites à des doses de quelques millièmes ; le glucose et le butyrate de sodium ont une action déprimante à partir de 1 pour 100 ; les décoctions de foin, de feuilles mortes et de terreau n'agissent pas défavorablement (Winodgradsky et Oméliansky) (1).

Production naturelle des nitrates. — Sous l'action combinée des différents microbes nitrificateurs, les matières humiques du sol, ainsi que les engrais organiques azotés, donnent naissance à des composés ammoniacaux, à des nitrites et à des nitrates. Mais si la production naturelle du nitre était depuis longtemps connue — comme en témoignent les instructions rédigées en 1777 par les régisseurs généraux des poudres et salpêtres — on en ignorait encore la véritable cause. A la suite des travaux de Kuhlmann sur l'oxydation de l'ammoniaque en présence de l'air et de la mousse de platine (oxydation donnant lieu à la for-

(1) *Annales agronomiques*, t. XXVI.

mation d'azotate d'ammoniaque), il fut admis que les nitrates prenaient naissance par voie chimique dans la terre faisant l'office d'un corps poreux. C'est seulement en 1878 que MM. SCHLŒSING et MÜNTZ découvrirent le processus biologique ou microbien de la nitrification (1). Depuis lors les organismes nitrificateurs ont été isolés, et de nombreuses recherches ont permis de bien préciser les conditions favorables à leur développement. Au point de vue agricole, la connaissance d'un tel phénomène présente le plus grand intérêt. Et DEHÉRAIN a pu dire avec raison : *Toute terre qui nitrifie bien est une terre fertile.*

Sans vouloir lier aussi étroitement la fertilité du sol à sa *capacité nitrifiante,* il faut bien reconnaître qu'il y a cependant une certaine relation de cause à effet. J'estime personnellement — et je l'ai maintes fois répété — que la détermination de la *capacité nitrifiante* en dirait plus que l'analyse chimique sur la fraction disponible ou utilisable de l'azote contenu dans la terre. Au point de vue économique, la question n'est pas d'un moindre intérêt... La culture s'impose tous les ans de lourds sacrifices pour acheter des engrais azotés; si nous pouvions, si nous savions tirer parti des ressources que nous offrent et la terre et les ferments qu'elle recèle, peut-être arriverions-nous à restreindre considérablement ces dépenses. Il suffirait pour cela d'exalter, en temps opportun, l'activité de la nitrification. Et d'abord, quelles sont les conditions favorables ou défavorables à la production naturelle des nitrates?

Influence des milieux. — Dans les sols perméables — qui mangent le fumier — l'oxydation des matières organiques atteint le maximum d'intensité : la *nitri-*

(1) C. R. de l'Académie des Sciences, tomes 84, 85, 86 et 89.

fication se poursuit toujours activement... Au contraire, si le sol est humide, gorgé d'eau, les *ferments oxydants* travaillent avec plus de difficulté, et la combustion de l'humus se trouve, par ce fait, considérablement ralentie. La nature des milieux influe donc de façon très sensible sur l'activité microbienne, et l'on peut dire que la *production naturelle des nitrates est étroitement subordonnée aux conditions générales de l'érémacausis.*

Cela ne fait aucun doute, d'ailleurs. Et comme la combustion lente des matières humiques nécessite le triple concours de l'air, de l'eau et de la chaleur — qui sont autant de facteurs essentiels de l'activité vitale — il n'y a pas de raison pour que le bon fonctionnement des organismes nitrificateurs ne soit influencé par les *agents atmosphériques.*

Mais ce n'est pas tout! Les caractères physico-chimiques du sol entrent aussi en ligne de compte. Les ferments ont besoin d'un support et d'aliments... Or, la terre arable, par sa structure et sa constitution, n'offre-t-elle pas ordinairement, à cet égard, les meilleures qualités? Elle est poreuse, et par cela même accessible aux agents extérieurs ; elle est perméable, ce qui détermine le mouvement de l'eau et de l'air; elle est suffisamment riche en éléments minéraux et organiques pour assurer la nutrition des microbes qui l'habitent : elle contient, enfin, le plus souvent, un stock considérable de matières à transformer.

Dès lors, si l'allure de la nitrification présente des irrégularités d'un sol à l'autre ou d'un moment à l'autre (pour une même terre), il sera très facile d'en rechercher la cause et d'y porter remède. Étant donné que les ferments sont universellement répandus, nous supposerons que les *microbes nitrificateurs* existent dans toutes les terres normalement consti-

tuées. Et si le milieu se montre trop réfractaire à leur activité, nous n'aurons à considérer alors que les deux cas suivants : Le sol est-il suffisamment accessible aux agents atmosphériques? Contient-il une matière azotée nitrifiable à l'état naturel ? De fait, les conditions pratiques de la nitrification sont à la fois d'ordre physique et d'ordre chimique.

1° Conditions physiques. — La minéralisation de l'humus comporte essentiellement des phénomènes d'oxydation, d'hydratation et de dédoublement qui sont surtout l'œuvre des ferments. Pour oxyder, il faut de l'oxygène : c'est l'air qui le fournit; pour hydrater, il faut de l'eau, et c'est encore de l'atmosphère, par les pluies, que le sol la reçoit. Mais l'eau qui tombe sur la terre meuble en déplace les gaz — du moins en partie — et il doit s'établir un équilibre convenable entre ces éléments.

L'expérience montre qu'un sol sec ne nitrifie pas. Dans les conditions habituelles, la quantité d'eau la plus favorable oscille de 10 à 15 pour 100. Si la terre est saturée, l'accès de l'air devenant impossible, la nitrification s'arrête. C'est ce qui ressort manifestement des multiples recherches effectuées par M. Th. Schlœsing. Mais la nature des terrains, en raison de leur inégale capacité pour l'eau, influe considérablement et recule la dose optimum. J'ai reconnu que le degré d'humidité le plus favorable est compris entre le quart et le tiers de la quantité d'eau totale qu'un sol peut retenir; dans les terrains humifères, par exemple, la nitrification croît avec l'humidité au-delà de 20 pour 100 et parfois jusqu'à 50 pour 100 (sols tourbeux).

La virulence ou l'activité des microbes croît aussi avec la température, mais pour des limites comprises entre 10 et 37 degrés. Dès lors, une terre qui s'échauffe aisément ou qui retient bien la chaleur

pourra se montrer plus propice aux transformations microbiennes. Et voilà comment le travail biologique se trouve lié aux propriétés physiques essentielles du sol : *porosité, perméabilité, échauffement.*

Les conditions climatériques n'étant pas toujours semblables d'une année à l'autre, il peut en résulter de sensibles variations dans la production des nitrates. P.-P. DEHÉRAIN a suivi pendant six ans, de mars 1892 à mars 1897, la marche de la nitrification dans la terre des cases de végétation de Grignon restées sans culture (terres nues) ; il a trouvé les quantités suivantes d'azote nitrique dans les eaux de drainage :

ANNÉES (de mars à mars)	PLUIE TOMBÉE (en millim.)	AZOTE entraîné par hectare (en kilog.)	
		dosé	différences
1892-1893	595,9	234,4	157,9
1893-1894	429,7	101,9	25,4
1894-1895	419,8	76,5	»
1895-1896	498,8	110,9	34,4
1896-1897	722,8	208,1	131,6

On voit ici très nettement l'influence de l'humidité sur la nitrification d'un même sol, suivant les saisons. La comparaison des nombres trouvés, par rapport au plus faible, est édifiante à tous égards : elle montre qu'une légère augmentation de pluie (un ou deux dixièmes) peut accroître d'un gros tiers la quantité d'azote nitrique.

Au reste, voici les conclusions formulées par DEHÉRAIN : « Les années 1892-93 et 1896-97, très humides, ont donné des eaux de drainage très riches, puisque la quantité d'acide nitrique entraînée des cases en jachère dépasse 200 kilogrammes à l'hectare ; quand, au contraire, la pluie est moins abondante, la teneur des eaux est beaucoup plus faible.

« Évidemment, il n'y a pas proportionnalité entre la pluie et l'azote des eaux, car d'autres facteurs interviennent, notamment la faculté que possède le sol de retenir cette eau ; c'est ainsi que, pendant l'année 1892-93, les cases venant d'être remplies, la terre était très poreuse, l'eau y séjournait aisément, et la nitrification a été très forte, supérieure à celle qu'on a constatée pendant l'année 1896-97, où la pluie a été cependant plus abondante, mais où la terre s'était tassée, car les façons à la bêche ne pouvaient lui donner une porosité semblable à celle qu'elle avait eue au moment du remplissage des cases (1). »

On s'explique alors pourquoi toutes les causes qui facilitent la pénétration des agents atmosphériques accélèrent la nitrification. Ainsi agissent le drainage et le travail du sol.

Il y a longtemps que Corenwinder a signalé les bons effets des labours sur la combustion des matières organiques. M. Schlœsing et P.-P. Dehérain ont bien montré, depuis, l'influence de la trituration du sol sur la nitrification. A Grignon, en novembre 1892, pour différentes terres mises en expériences, on obtint après un mois les quantités suffisantes d'azote nitrifié (2) :

	AZOTE NITRIQUE (EN GRAM.) POUR 100 DE TERRE.		
	Grignon.	Marmilhat.	Palbost.
Terres triturées . .	0,044	0,051	0,071
Terres non triturées . .	0,002	0,002	0,002

D'autre part, l'analyse des eaux de drainage, effectuée le 8 mars 1893, donna par mètre cube :

(1) P.-P. Dehérain : *Traité de chimie agricole*, p. 481.
(2) *Annales agronomiques*, t. XIX, p. 410.

	AZOTE NITRIQUE (EN KILOGR.) PAR MÈTRE CUBE.		
	Terre de Grignon	Terre de Marmilhat.	Terre de Palbost.
Terres triturées . . .	2,380	1,240	0,570
Terres non triturées . .	0,025	0,027	0,028

L'action de la trituration est des plus manifestes. Faut-il l'attribuer exclusivement à l'aération qui peut en résulter ? En réalité, cette cause n'est pas la seule à considérer ; le déplacement des ferments intervient aussi, et M. Schlœsing nous en donne la raison :

« Ne vaudrait-il pas mieux, dit-il, placer l'explication cherchée dans ce fait qu'en remuant la terre on favorise l'œuvre des organismes qui sont les agents de la combustion ? On conçoit que dans les milieux liquides les êtres microscopiques puissent se déplacer aisément et porter leur action sur tous les points. Mais dans la terre ils ne jouissent pas de cette facilité de transport ; ils ne trouvent sur la surface des éléments moyennement humides que des couches d'eau infiniment minces, peu propices à leur déplacement ; ils agissent donc sur place, et quand ils ont consommé la plus grande partie des éléments à leur portée, leur travail doit se ralentir. Si l'on émiette la terre, on les répand en d'autres endroits où ils trouvent de nouvelles ressources, où ils se développent en travaillant avec activité. De là, le redoublement de vigueur. »

Et voilà comment les *agents atmosphériques* : l'air, l'eau et la chaleur, contribuent puissamment à la production naturelle des nitrates dans la terre arable. Étant donné que celle-ci leur est d'autant plus accessible que son *coefficient de perméabilité* est lui-même plus élevé, on comprend très bien pour quelles raisons les sols légers ou meubles dévorent les engrais organiques azotés. Dans les terres plus compactes,

où l'érémacausis présente moins d'intensité, la nitrification s'effectuera d'autant mieux qu'on donnera plus de façons culturales pour maintenir un ameublissement parfait.

2° CONDITIONS CHIMIQUES. — Les ferments nitrificateurs n'exigent pas seulement le concours de l'air, de la chaleur et de l'humidité ; il faut aussi que la terre, qui leur sert de support, constitue un milieu de culture convenable.

Dans les *sols acides* — où les mucorinées remplacent les bactériacées — la nitrification de l'humus est à peu près impossible ; il faut donc, de toute nécessité, que le milieu soit neutre ou très légèrement alcalin. C'est la première condition ; nous la supposerons satisfaite.

D'autre part, étant donné que la richesse en acide carbonique de l'atmosphère du sol assure l'alimentation carbonée des bactéries nitrifiantes ; que les phosphates et les sulfates — sauf de très rares exceptions — sont assez répandus dans nos terrains pour suffire aux besoins de la vie microbienne, il ne reste à considérer, en somme, que la présence d'une base salifiable (carbonate terreux) et d'une matière azotée nitrifiable. Que faut-il entendre par là ?

Base salifiable. — On désigne ainsi toute base susceptible de saturer ou de neutraliser l'acide azoteux provenant de l'oxydation de l'ammoniaque par les ferments nitreux. Dans les solutions nutritives, ce rôle incombe à la magnésie apportée sous forme de carbonate ; dans le sol, où la chaux est plus abondamment répandue, c'est elle qui intervient.

Pendant longtemps, les agronomes ont cru que le calcaire seul pouvait favoriser la nitrification. Il résulte des essais effectués par M. CROCHETELLE et moi, en 1893, que les carbonates alcalins (notamment celui de potasse) agissent aussi très favora-

blement (1). Enfin, les essais plus récents de MM. Boullanger et Massol (2) montrent que la plupart des carbonates métalliques peuvent être employés sans danger dans les cultures pures de nitrosomonas.

Est-il nécessaire que la base salifiable soit combinée à l'acide carbonique ? Les carbonates alcalins et terreux peuvent-ils être remplacés par d'autres sels ? Pour le savoir, j'ai fait nitrifier des sols tourbeux dépourvus d'acide carbonique combiné. Dans tous les cas, en présence des sels ammoniacaux ou des humates alcalins et terreux, la nitrification se produisit normalement, et les eaux d'épuisement contenaient des nitrates où l'analyse microchimique permettait de caractériser la base précédemment combinée à l'acide humique. D'où je conclus : *que dans les sols dépourvus de carbonates* — où la nitrification est toujours possible si l'on apporte ou s'ils contiennent des matières azotées nitrifiables — *la base salifiable peut être fournie par les humates alcalins ou terreux.* Il n'y a aucune raison, d'ailleurs, pour ne pas admettre que tous les sels à éléments non toxiques, dont les acides sont déplaçables par l'acide azoteux ou l'acide azotique, ne puissent fournir la *base salifiable* nécessaire à la production naturelle des nitrates.

Matière nitrifiable. — Les sels ammoniacaux que l'on incorpore au sol, ceux qui s'y forment naturellement pendant la phase d'ammonisation, nitrifient d'ordinaire avec rapidité, et en moins de plusieurs semaines lorsque les conditions sont favorables. Ces composés constituent autant de matières azotées

---

(1) C. R. de l'Académie des Sciences, t. CXVII.
(2) *Annales de l'Institut Pasteur* (année 1903).

directement nitrifiables. Peut-on en dire autant des substances humiques ? Non ! il est même des cas où elles se montrent réfractaires à toute nitrification. Au point de vue agricole, il importe de bien préciser ce fait. Dans le sol, l'humus nous apparaît comme une source de nitrates. Pourquoi se montrerait-il inerte ? Les nombreuses recherches que j'ai effectuées sur différents sols tourbeux me permettent d'en donner l'explication. Tout d'abord, je poserai en principe :

1° Que les matières azotées de l'humus, considérées sous leurs diverses formes, ne sont pas également nitrifiables ;

2° Que la minéralisation de l'humus implique la présence de sels alcalins susceptibles de désagréger et de dissoudre les substances humiques.

I. — Les matières azotées de l'humus ne possèdent pas la même *capacité nitrifiante*. S'il en était autrement, l'appauvrissement des terres cultivées deviendrait évidemment trop rapide. Il semble, au contraire, que la nitrification des substances humiques se manifeste lentement, comme si elle ne devenait possible qu'à partir d'un certain état de décomposition.

On sait dans quelle mesure les alcalis et les carbonates alcalins réagissent sur l'humus brut : ils déterminent un dégagement d'azote ammoniacal, à chaud surtout, et dissolvent parfois les quatre cinquièmes des matières azotées. La solution d'humate ainsi obtenu précipite incomplètement par les acides, et l'analyse élémentaire montre que les substances *précipitables* et *non précipitables* ont une constitution chimique différente.

D'autre part, en établissant l'inégale résistance de l'azote, nous avons reconnu que les matières humiques non précipitables offrent la moindre stabilité.

Viennent ensuite, avec une forte disproportion, les substances précipitables : les acides de l'humus et les matières insolubles. Tous ces composés, pris isolément, nitrifient-ils avec une égale facilité ? Pour répondre à cette question, j'ai effectué quelques recherches que je crois utile de relater ici, bien qu'elles soient incomplètes.

Une terre très tourbeuse fut épuisée par une solution normale de carbonate de potassium (250 grammes de solution pour 100 grammes de terre sèche). Après un lavage prolongé, le résidu fut séché, finement pulvérisé et tamisé; on traita, d'autre part, le liquide noir par un léger excès d'acide sulfurique (1), et l'on recueillit le précipité qui fut également séché dans le vide et réduit en poudre. J'incorporai ensuite l'*humus insoluble*, l'*acide humique* et le liquide contenant la *matière non précipitable* à une terre franche (dosant 1,57 d'azote par kilo) en telles proportions que sa richesse azotée fut accrue d'un millième. On suivit comparativement, pendant quatre mois, la marche de la nitrification dans la terre normale et dans la terre traitée.

Les résultats obtenus, du 15 mai au 15 septembre 1901, sont consignés dans le tableau suivant :

MATIÈRES AJOUTÉES	le 15 juin	le 16 juillet	le 15 août	le 15 sept.
Témoin	3,5	5,9	6,6	8,1
Humus insoluble	2,9	5,5	6,7	7,8
Humus soluble.				
a) précipitable . . .	4,8	8,6	11,4	13,3
— b) non précipitable.	0,3	10,2	18,7	21,2

(1) On n'a pas employé l'acide chlorhydrique, pour ne pas introduire des chlorures dans la partie non précipitable.

On voit combien est inégale l'aptitude à la nitrification des composants organiques de l'humus. Tandis que le résidu insoluble dans les alcalis se montre très résistant, puisqu'il n'a pas nitrifié, on observe, au contraire, une nitrification très active pour la fraction des matières organiques solubles dans les carbonates alcalins mais non précipitables par les acides. Etant donnée la nature des principes azotés de l'humus, ces résultats paraissent évidents *a priori*. Cependant, rien ne nous autorise à dire que le résidu humique insoluble resterait indéfiniment inerte dans le sol; à la longue, il peut se consumer et devenir nitrifiable.

C'est sous la forme d'*humate* que les matières azotées du sol semblent le plus aptes à la nitrification. M. Th. Schlœsing a étudié la transformation de l'humate de chaux, et j'ai moi-même, en 1894, fait nitrifier avec succès des humates alcalins en solution plus ou moins étendue, C'est l'*humate ammoniacal* (1), en raison de sa constitution, qui donne les plus fortes quantités d'azote nitrique. Mais il paraît difficile d'établir si tout l'azote nitrifié provient de l'ammoniaque ou de l'acide humique. Avec les *humates potassiques* et *sodiques* (2), c'est bien l'azote organique de l'humus qui se transforme.

---

(1) Les expériences plus récentes de MM. Muntz et Lainé établissent aussi que ce composé nitrifie activement. De plus, sous cette forme, l'ammoniaque se transforme plus vite qu'à l'état de sulfate (C. R. de l'Académie, année 1907).

(2) Les solutions avaient été préparées en traitant un kilogramme de terre humifère par un litre d'eau contenant 2 gr. 5 de carbonate alcalin. On a employé comparativement le liquide tel quel (solution normale) et étendu de moitié d'eau (solution étendue).

AZOTE NITRIQUE (EN MILLIGR.) OBTENU APRÈS DOUZE JOURS PAR LITRE DE LIQUIDE			
a) Humate de potasse.		b) Humate de soude.	
normal.	étendu.	normal.	étendu.
162,5	86,0	54,0	62,5
172,5	87,0	57,0	55,0

Au moment de la mise en expérience, les solutions dosaient respectivement (*a*) 38 milligrammes et (*b*) 43 mg. 5 d'azote nitrique. L'humate de potasse accuse un gain moyen de 130 milligrammes en 12 jours, tandis que celui de soude (solutions étendues) donne seulement 16 milligrammes.

Quand je rendis compte de ces résultats à la *Société d'agriculture de Châteauroux*, je fis la remarque suivante : « Il ne semble pas qu'avec l'humate de soude il y « ait une augmentation bien sensible ; il se peut que le « ferment se déplaise dans un semblable milieu et ne tra- « vaille pas. Dans le ballon contenant le sel sodique, le « liquide était recouvert par un léger voile ; dans l'autre, « il avait conservé la même pureté : la couleur seule était « moins prononcée. Examinées au microscope, les deux « solutions présentent une petite particularité : dans la « dissolution d'humate de potasse, les ferments sont plus « abondants à la partie inférieure ; dans l'autre, au con- « traire, on les rencontre surtout au voisinage du voile. « serait-ce parce que dans un milieu qui n'est pas à leur « gré les ferments de la nitrification, comme beaucoup « d'autres, remontent à la surface ? C'est aux microbiolo- « gistes qu'il appartient de résoudre la question (1). »

Les timides observations que je formulais ont reçu depuis la consécration expérimentale : la nitrification des humates alcalins n'est plus contestée, les sels de soude sont utilisés de préférence aux autres dans la culture du ferment nitrique. On en arrivera même à l'emploi des humates alcalins pour les cultures pures.

(1) *Bulletin de la Société d'agriculture de l'Indre*, mai 1895.

II. — Il est généralement admis que les sols trop chargés d'humus se montrent réfractaires à la nitrification. On en attribue la cause à un excès d'acidité. Or, il arrive fréquemment que des terrains tourbeux, même bien pourvus de calcaire, se comportent de façon identique : l'azote y reste passif. En ce cas, puisque l'acidité ne peut entrer en ligne de compte, on s'explique mal l'inertie persistante des substances humiques azotées. D'où vient alors l'inaptitude à la nitrification ? Faut-il l'imputer à l'absence des ferments ou à l'état de l'humus ?

Tout d'abord, il importait d'établir si les propriétés biologiques du sol n'étaient pas insuffisantes. Et l'idée me vint alors d'incorporer à une tourbe calcaire des environs d'Amiens une matière nitrifiable : je choisis le sulfate d'ammoniaque.

D'autre part, pour savoir si l'inertie de l'azote ne dépendait pas de la constitution chimique du milieu, j'essayai l'action du carbonate de potasse qui a la propriété de mobiliser l'humus.

Dans les deux cas, je suivis la marche de la nitrification. Voici les résultats obtenus, rapportés à 100 grammes de terre :

DOSES D'ENGRAIS pour 100	AZOTE NITRIFIÉ (EN MILLIGR.)			
	10 sept.	20 sept.	1er oct.	10 oct.
Rien (témoin). . . .	0,95	1,0	1,0	1,1
Sulfate d'amm., 0,3 . .	33,7	50,0	60,0	61,0
Carbon. de potas., 0,3.	9,3	12,60	15,6	19,0

On remarquera combien la nitrification du sulfate d'ammoniaque a été rapide. M. Schlœsing, puis MM. Muntz et Girard ont reconnu qu'en moins d'un

mois les sels ammoniacaux sont transformés en nitrates dans les terres ordinaires ; il n'a pas fallu plus de temps avec la terre humifère mise en expérience. Dans une autre série d'essais, effectués avec des tourbes de différentes natures, les résultats obtenus sont du même ordre. Le carbonate de potasse, partout, a activé la nitrification. Et c'est le point important qu'il faut retenir.

Ainsi, voilà un *sol humo-calcareux* qui refuse de nitrifier convenablement, malgré sa grande richesse en azote. Or, sans apport de ferments, il nitrifie l'engrais ammoniacal qu'on y incorpore ; bien plus, il a suffi d'y ajouter quelques millièmes de carbonate de potasse pour le remettre en état. Que conclure de ces essais ? Sinon que la capacité nitrifiante se trouvait suspendue, dans ce sol, par un défaut d'*ammonisation* imputable à l'absence de toute matière pouvant vaincre l'inertie de l'humus et engendrer des humates solubles.

C'est le défaut de potasse, souvent, qui rend les sols tourbeux inaptes à la nitrification dans les conditions naturelles (1).

Influences diverses. — On croyait tout d'abord — et beaucoup d'agronomes l'enseignent encore — que la chaux seule suffit à provoquer la nitrification des matières humiques. Cette affirmation, qui repose sur les bons effets du chaulage, ne saurait prévaloir contre la vérité scientifique. En effet, comme on chaule surtout les sols granitiques et les sols argileux ou argilo-sableux, tous riches en potasse, il fallait, pour

(1) Je l'ai démontré expérimentalement depuis une dizaine d'années. Mes nombreuses recherches sont consignées dans mon ouvrage sur *Les sols humifères*.

préciser l'action de la chaux et du calcaire sur la minéralisation de l'humus, expérimenter ces amendements dans des terrains notoirement pauvres en composés potassiques. A ce point de vue, les terres tourbeuses conviennent parfaitement. Or, l'expérience nous montre que le chaulage et le crayonnage n'y provoquent jamais une nitrification abondante, à moins qu'on n'apporte en même temps des matières azotées directement nitrifiables. L'emploi des engrais potassiques, au contraire, donne toujours de merveilleux résultats, ce qui nous autorise à dire que *l'action de la chaux et du calcaire sur la nitrification de l'humus, en sols granitiques ou argileux riches en potasse passive, est toujours de sens indirect, puisqu'elle se traduit par la mobilisation d'une certaine quantité de potasse.*

Comment cet élément agit-il sur la production des nitrates? Voilà ce qu'il faut rechercher. Les expériences que nous avons effectuées, M. Crochetelle et moi, sur l'action des carbonates, des sulfates et des chlorures alcalins, nous ont montré (1) :

1° *Que les engrais potassiques peuvent favoriser notablement la transformation des matières organiques du sol et la nitrification de l'azote ;*

2° *Que le carbonate de potasse, employé à des doses convenables, détermine toujours une nitrification abondante, que la terre soit riche ou pauvre en chaux ;*

3° *Que l'action du sulfate et du chlorure de potassium est subordonnée à la présence du calcaire, et aussi dans une certaine mesure* (pour le chlorure surtout) *à la fréquence des pluies dans les régions sèches ;*

---

(1) C. R. de l'Académie des Sciences, t. CXVII, CXVIII et CXIX.

4° *Qu'il existe enfin, dans tous les cas, une dose limite, variable suivant la nature des sols, à partir de laquelle la nitrification peut se trouver entravée* (1).

Pourquoi le carbonate de potasse agit-il favorablement dans tous les sols humifères ? Pourquoi les autres engrais ne sont-ils actifs qu'en présence du calcaire ? Pour quelles raisons, enfin, les chlorures ne produisent-ils de bons effets qu'après les pluies ? On peut aisément répondre à ces questions en se basant sur ce que le carbonate de potasse seul réagit sur l'humus, le solubilise et le rend ainsi nitrifiable... L'action des autres sels se trouve donc subordonnée à leur transformation en carbonate, laquelle n'est possible qu'en présence du calcaire. Dans les sols dépourvus de cet élément, il suffit de l'y incorporer pour assurer l'efficacité des engrais potassiques. La nécessité des pluies résulte du fait même que tous les chlorures paralysent la nitrification, et comme c'est le chlore qui se montre défavorable, il faut que les eaux l'entraînent dans les couches inférieures où l'activité nitrifiante ne se manifeste point.

III. — Ferments dénitrificateurs.

Il y a près de cinquante ans que Goppelsroder et Smith ont signalé différents cas de réduction du salpêtre dans le sol et dans les solutions nitratées. En 1873,

(1) Un grand nombre d'autres substances peuvent accélérer la nitrification : je citerai notamment la chaux, le calcaire, le plâtre, le superphosphate, et d'une manière générale tous les corps susceptibles de mobiliser la potasse du sol — mais à condition qu'ils puissent engendrer directement ou indirectement des humates ou des carbonates alcalins.

M. Th. Schlœsing constata le même fait : il reconnut que dans une terre humide, en vase clos, les nitrates disparaissaient et que l'atmosphère du ballon s'enrichissait en *acide carbonique* et en *azote*. Deux ans après, Mensel établit que cette décomposition n'a jamais lieu en présence des antiseptiques, et il conclut, de ce fait, que la dénitrification est imputable à des actions microbiennes. Les multiples expériences effectuées depuis, par différents savants, nous ont appris que si nombre de ferments sont capables de réduire les nitrates, leur action ne se manifeste pas toujours de façon identique. Et il est maintenant démontré que la *dénitrification* comporte parfois toutes les phases inverses de la nitrification : les nitrates pouvant être réduits en nitrites, en ammoniaque, en oxydes d'azote et en azote libre. Dans tous les cas, le concours des matières organiques paraît indispensable à la manifestation de ce phénomène.

Dénitrification directe. — En 1882, MM. Dehérain et Maquenne, après avoir étudié la fermentation butyrique (1) provoquée par la terre, démontrèrent que le *Bacillus butyricus* (fig. 18) est un puissant agent de dénitrification, et qu'il suffit d'incorporer successivement des nitrates à une fermentation butyrique active pour voir se produire un abondant dégagement d'*azote* et de *protoxyde d'azote*.

Les gaz du ballon contiennent, en outre, de l'acide carbonique et de l'hydrogène. Il se forme aussi, aux dépens du sucre, des acides acétique et butyrique et de petites quantités d'alcool.

---

(1) *Annales agronomiques*, t. IX, p. 5. On produit la fermentation butyrique en ensemençant, avec de la terre ou du vieux fromage, une solution contenant 3 grammes de sucre par litre, 50 ou 100 gr. de craie et quelques centigrammes de phosphate d'ammoniaque : le tout étant placé dans un grand ballon de plusieurs litres, muni d'un tube de dégagement assez large et maintenu à 30 ou 35 degrés.

Le *Bacillus denitrificans,* étudié par MM. Giltay et Aberson, réduit les nitrates en donnant naissance à de l'azote et à de l'acide carbonique sans mélange d'autres gaz. Avec le *Bacillus pyocyaneus*, les nitrates sont décomposés sans dégagement de gaz carbonique : il se fait



Fig. 18. — *Bacillus butyricus.*

alors du bicarbonate et du carbonate de potasse qui rendent le milieu alcalin (1).

Dans tous les cas, des ferments transforment les nitrates en azote libre : *ce sont des dénitrificateurs directs.*

Dénitrification indirecte. — La réduction des nitrates ne se fait pas toujours suivant le processus que nous

(1) Les réactions suivantes, dans lesquelles la matière organique est représentée par son carbone, symbolisent la décomposition des nitrates avec et sans dégagement d'acide carbonique :

$$4\ (AzO^3K) + 5\ C + 2\ (H^2O) = 4\ (CO^3HK) + CO^2 + 4\ Az$$
$$4\ (AzO^3K) + 3\ C + H^2O = 2\ (CO^3HK) + CO^3K^2 + 4\ Az$$

venons d'indiquer ; il est des cas, en effet, où les ferments dénitrificateurs, vivant seuls ou en symbiose, donnent naissance à des nitrites ou à de l'ammoniaque... Ces régressions équivalent, en somme, à une hydrogénation à l'état naissant (1).

M. Héraéus, en 1886, a signalé des cas de réduction partielle, sans mise en liberté d'azote, chez le *Micrococcus prodigiosus*, le *Staphylococcus citreus*, le *Bacillus anthracis* et le Bacille typhique... MM. Burri et Stutzer ont isolé deux ferments nitrificateurs dont l'un vit en symbiose avec le *Bacterium coli*. Ici, le dégagement d'azote ne se manifeste qu'en présence des substances *peptonisées* ou *amidées ;* on peut admettre alors la formation des nitrites en un milieu acide, déterminant la mise en liberté de l'acide azoteux, lequel provoque la diazotation des fonctions amidées (2). En ce cas, l'azote dégagé comprend à la fois celui de l'acide nitreux et celui de l'amide. C'est un bel exemple de dénitrification indirecte.

Dénitrification dissimulée. — Que le nitrate soit réduit directement ou indirectement, la production de l'azote libre rend toujours le phénomène apparent, saisissable... Mais du fait qu'il ne se produit pas un dégagement gazeux d'azote, doit-on dire qu'il n'y a pas eu de réduction ? Non... Certains ferments, après transformation des nitrates en nitrites ou en ammoniaque, absorbent ces composés et les utilisent pour leur développement. Le *Bacterium agreste* assimile les corps nitrés, par exemple,

---

(1) Nous avons vu que l'hydrogène se trouve parmi les produits formés dans la fermentation butyrique de la terre : ce gaz ne se formerait-il pas avec d'autres ferments ? Si oui, il se pourrait que dans certains milieux la réduction des nitrates s'arrêtât aux premiers termes, sans donner lieu à un dégagement d'azote libre.

(2) Cette réaction aboutit à la formation d'un acide et à la mise en liberté de l'azote. L'urée [$CO(AzH^2)^2$] traitée par l'acide azoteux (AzO-OH) donne ainsi de l'azote, de l'eau et de l'acide carbonique :

$$CO < \begin{matrix} AzH^2 \\ AzH^2 \end{matrix} + \begin{matrix} AzO\text{-}OH \\ AzO\text{-}OH \end{matrix} = 4\,Az + CO^2 + 3\,(H^2O)$$

et le *B. pneumoniæ* s'accommode très bien de l'ammoniaque formée dans la dénitrification partielle. L'azote employé à la nutrition de ces microbes rentre de nouveau dans la circulation sous forme organique. Et c'est en raison même de la disparition des produits azotés intermédiaires que la dénitrification se trouve alors dissimulée.

Considérations pratiques. — La dénitrification offre-t-elle, dans la pratique, de sérieux inconvénients? Les terres cultivées perdent-elles de fortes proportions d'azote? S'il faut en croire les agronomes allemands, la réduction des nitrates n'aurait pas lieu dans les milieux chargés d'oxygène; on suppose donc que les ferments réducteurs empruntent cet élément aux sels oxygénés qu'ils décomposent. M. Wagner a reconnu qu'une terre additionnée de bouse de vache perd une partie des nitrates qu'elle renferme et donne ainsi des récoltes moindres (1895).

M. Bréal (1) a montré, en 1892, que la dénitrification peut se produire, même à l'air libre : à 2 grammes de paille de blé (contenant 0 gr. 0097 d'azote organique) placés dans un verre avec 400 centigrammes d'eau, il ajoute peu à peu du nitrate de potasse. A la fin de l'expérience, il établit le bilan de l'azote, qui lui donne :

	en gr.
1° *Azote apporté à l'origine :*	
Par la paille.	0,0097
Par le salpêtre	0,0260
Total. . .	0,0357
2° *Azote final retrouvé* . .	0,0271
3° *Azote ayant disparu* . .	0,0086

Avec la paille de maïs et la luzerne, les résultats obtenus sont du même ordre.

(1) *Annales agronomiques*, t. XVIII, p. 181.

En additionnant d'*amidon* des liquides appropriés, où les ferments dénitrificateurs étaient apportés par de la paille, du crottin de cheval, du fumier frais ou de la terre, DEHÉRAIN a pu observer une réduction sensible des nitrates. Ces recherches l'ont conduit à formuler les conclusions suivantes :

« Les ferments dénitrificateurs n'utilisent que l'oxygène des nitrates; en opérant dans des appareils disposés à recueillir les gaz dégagés, on a retrouvé presque tout l'azote introduit, soit à l'état libre, soit à l'état de protoxyde d'azote; l'amidon est brûlé et transformé en acide carbonique. La potasse du salpêtre passe à l'état de carbonate.

« L'action réductrice de ces ferments est naturellement plus énergique en vase clos qu'à l'air libre. Quand, dans une culture renfermant du nitrate de potasse, de l'amidon et quelques traces de phosphate potassique, on fait passer un courant d'air rapide, la réduction est très ralentie; on finit pourtant par obtenir la réduction complète des nitrates si on ajoute de l'amidon à mesure qu'il disparaît...

« La terre additionnée d'amidon finit par perdre tous ses nitrates. Ainsi, sur 100 parties d'azote nitrique, existant le 13 octobre 1896, il en est resté :

Le 31 octobre 1896.	88,8
Le 2 décembre 1896	53,3
Le 24 décembre 1896	24,0
Le 20 décembre 1897	1,1

« Quand, au lieu d'amidon, on introduit dans la terre de la paille, la disparition est moins rapide.

« Quoi qu'il en soit, ces expériences démontrent clairement que la terre renferme des bactéries dénitrifiantes; et comme leur rôle est néfaste, qu'elles ramènent à l'état libre l'azote que les fixatrices d'azote ont engagé en combinaison, que si elles

dominent, la terre s'appauvrit d'azote au lieu de s'enrichir, il importe de bien connaître les conditions dans lesquelles disparaît le plus puissant des engrais azotés (1). »

Quelles sont donc les causes qui favorisent la dénitrification ? On peut signaler comme nettement favorables : l'*abondance des matières organiques et les excès d'humidité ou de sécheresse.* MM. Wagner et Mœrcker, pensant que les fumiers et autres engrais organiques naturels apportaient au sol des ferments dénitrificateurs, conseillaient de traiter préalablement ces matières par des acides forts. Étant donné le nombre considérable de bactéries dénitrifiantes existant dans le sol, une telle opération serait dispendieuse et sans effet. Au reste, comme l'a très bien montré M. Warington, l'excès seul de matière organique est l'origine des actions réductrices.

Dans les terres gorgées d'eau ou fortement tassées, dans toutes celles, en un mot, où l'oxygène pénètre difficilement, les nitrates se décomposent toujours avec plus de rapidité. Pour s'en rendre compte, on peut, à l'instar de M. Bréal, faire passer continuellement les mêmes eaux de drainage nitratées dans un long tube de verre rempli de terre de jardin : les eaux riches, au début, s'appauvriront progressivement et ne donneront plus trace de nitrates après trois semaines.

L'excès de sécheresse, comme l'a reconnu M. Giustiniani (2), favorise également la dénitrification. Ainsi, des sols riches en nitrates, abandonnés à la dessiccation spontanée, laissent dégager de l'azote, bien que les ferments réducteurs soient dans un milieu aéré.

---

(1) *Traité de Chimie agricole*, p. 491.
(2) *Annales agronomiques*, t. XXVII.

Mais dans les terres soumises à la culture doit-on redouter ces pertes? Il ne semble pas qu'il y ait lieu de s'en préoccuper autrement; les régions superficielles, constamment aérées, remuées, pénétrées par les agents atmosphériques, sont par cela même dans des conditions nettement défavorables à la dénitrification. Seules, les couches profondes pourraient se prêter à la réduction, mais la fraction des nitrates entraînés à d'aussi grandes distances doit être très faible. De plus, les ferments y sont moins abondants.

IV. — Ferments fixateurs d'azote.

Il y a plus d'un demi-siècle, quand Boussingault entreprit ses intéressantes recherches sur l'assimilation de l'azote, on était bien loin de supposer que des êtres infiniment petits pussent contribuer efficacement à l'enrichissement du sol. On croyait alors que les eaux météoriques : pluie, neige, brouillard, etc., entraînaient, dans leur chute plus ou moins rapide, une forte proportion des composés nitrés qui se forment dans l'atmosphère sous l'action des *effluves électriques*. — Mais les multiples dosages effectués en Alsace par Boussingault, à Rothamsted par Lawes et Gilbert, ont montré que sous nos climats tempérés ces apports d'azote n'excèdent pas 6 à 8 kilogrammes par hectare et par an : ils sont notoirement trop faibles en comparaison des gains considérables réalisés par les terres de prairie.

Dès lors, il fallut chercher une autre explication, et la question des *plantes améliorantes* vint à l'ordre du jour. Georges Ville, qui soutint avec tant d'ar-

deur la théorie de la *sidération*, ne réussit que très imparfaitement à faire prévaloir ses idées.

On se perdait alors en discussions confuses et parfois violentes. Bientôt, cependant, le mystère allait s'éclaircir. Et tandis que M. Berthelot démontrait le caractère microbien de la fixation de l'azote par le sol, Hellriegel et Wilfarth établissaient, d'autre part, le processus de la nutrition azotée des légumineuses. Ces grandes découvertes ne tardèrent pas à forcer l'opinion : elles ont déjà inspiré des travaux du plus haut intérêt qui permettaient de dire, à l'un de nos plus éminents agronomes : « Le règne des engrais azotés finit, celui des bactéries commence. »

Données expérimentales. — De nombreux essais établissent que la terre arable s'enrichit sensiblement en azote par action microbienne. Mais les gains réalisés, pour un temps donné, dépendent à la fois de la nature du sol, de sa richesse en humus et de son état de culture. Pour déterminer l'enrichissement intégral du sol, il faut supprimer l'apport des fumures azotées, écarter toutes les causes d'épuisement ou établir le bilan rigoureux de l'azote apporté, exporté et perdu... Les analyses faites à de certains intervalles permettraient alors de suivre l'intensité de la *sidération*. Pratiquement, dans la grande culture, on ne peut guère appliquer ces moyens de recherche : à cause de l'entraînement des nitrates par les eaux et de la dénitrification, qui se produit parfois dans les couches profondes, les données recueillies sont toujours inférieures à la réalité. C'est donc aux essais de laboratoire, aux expériences en petit, aux cultures en pots qu'il a fallu recourir pour apprécier rigoureusement les gains d'azote des terres nues ou emblavées.

Expériences de M. Berthelot (1). — Les sols vierges ou cultivés, les sables ou l'argile brute convenablement humectés fixent l'azote atmosphérique dans les conditions naturelles. En analysant des sables jaunes de Meudon, exposés à l'air pendant plus d'une année, M. Berthelot put constater un enrichissement faible mais continu en *azote combiné;* il obtint, par kilogramme, les nombres suivants (en grammes) :

Le 25 mai 1884	0,0705
Le 30 avril 1885.	0,0833
Le 10 juillet	0,1035
Le 24 octobre	0,1105

Soit au total — par rapport à la richesse azotée primitive — un accroissement de 0 gr. 0400 ou de 37 pour 100 environ.

Après avoir reconnu que les terres et les sables stérilisés par la chaleur cessaient de s'enrichir en azote, M. Berthelot étudia comparativement les gains réalisés, en milieux semblables, par des sables et des argiles très pauvres, provenant aussi des environs de Meudon. Les échantillons furent placés dans des flacons. Analysés au début (azote initial) et à la fin de l'expérience — de mai à octobre 1885 — ils accusèrent tous un gain très sensible :

	AZOTE DOSÉ POUR 100		
	au début	à la fin	excédents
a) Sable jaune . . .	0,0910	0,1289	0,0379
b) — — . . .	0,0109	0,1503	0,0484
c) Argile pure . . .	0,0210	0,0495	0,0285
d) — — . . .	0,1065	0,1236	0,0171

D'autres essais, effectués sur 50 kilogrammes de terre nue (en pot), permirent d'établir ainsi le bilan de l'azote après sept mois et demi d'expérience :

(1) *Chimie végétale et agricole*, t. I, p. 20.

	EN GRAMMES
A. — *Azote de la terre à l'origine* . . .	54,600
Azote apporté par la pluie :	
1° ammoniacal	0,048
2° nitrique	0,013
3° organique	0,013
B. — *Azote de la terre à la fin*	78,600
Azote des eaux de drainage . . .	0,198

La différence entre les sommes B et A accuse un gain de 24 gr. 124 d'azote correspondant à 30 kilogrammes par hectare de terre prise à la profondeur de dix centimètres.

Expériences de MM. Gautier et Drouin. — La présence des matières organiques favorise-t-elle à un haut degré l'enrichissement du sol en azote ? Est-elle nécessaire ou indispensable à l'activité microbienne ? Pour le savoir, MM. Gautier et Drouin ont entrepris une série de recherches (1) dans des milieux artificiels formés de sable, de calcaire et d'argile, additionnés de très petites quantités de phosphate de potasse et d'une dose appréciable de matières organiques diverses : charbon de bois calciné, charbon pulvérisé et lavé aux acides, acide humique dérivé du sucre, etc...

Les résultats obtenus montrent que les sols privés de matières organiques ont perdu de l'azote, tandis que tous les autres en ont fixé des quantités dix fois plus fortes que l'eau acidulée exposée à l'air des champs, comme dans les expériences de M. Schlœsing. Ces constatations ne sont pas sans intérêt : elles nous apprennent que les substances hydrocarbonées exercent une action des plus favorables sur le développement des bactéries.

Il convient de remarquer que si toutes les terres sans végétation *(sols nus)* s'enrichissent directement

---

(1) C. R. de l'Académie des sciences, t. CXVI, pp. 754, 863, 945, 1098 et 1232.

en azote combiné quand on les expose à l'air, les gains réalisés sont toujours plus élevés en présence des substances organiques. De fait, ainsi que je l'ai reconnu moi-même, les *matières humiques* — surtout à l'état d'*humates* — conviennent parfaitement à l'évolution des microbes fixateurs d'azote et contribuent ainsi, dans une large mesure, à l'enrichissement du sol. Il suit de là que les terres en prairie, au même titre que les sols forestiers, où les débris végétaux abondent, doivent s'enrichir considérablement, à la longue, à mesure que la dose d'humus s'accroît.

D'après M. Henri (1), une forêt de hêtres accumule, par hectare et par an, 45 à 55 kilogrammes d'azote. Des feuilles de chêne et de hêtre abandonnées à l'air pendant plusieurs mois ont fixé respectivement 0,40 et 0,78 pour 100 d'azote. Dans les sols de prairie, les gains ne sont pas moins sensibles.

A Grignon, Dehérain suivit le mouvement de l'azote dans deux parcelles du champ d'expériences qui furent cultivées en *sainfoin*, de 1879 à 1885, puis transformées en prairies naturelles jusqu'en 1888. Les dosages d'azote effectués régulièrement, tous les deux ou trois ans, ont donné :

	AZOTE POUR 1000			
	1879	1881	1885	1888
Parcelle fumée avant. . .	1,50	1,65	1,77	1,98
Parcelle sans engrais. . .	1,46	1,50	1,65	1,81

Même sans tenir compte des prélèvements faits par les plantes, c'est-à-dire de l'azote contenu dans le foin récolté, les gains annuels — pour un hectare de

(1) *Annales de la science agronomique*, année 1897.

terre pris à $0^{m},10$ et pesant 2000 tonnes — seraient de 70 et de 96 kilogrammes.

Les résultats obtenus par Lawes et Gilbert, à Rothamsted, ne sont pas moins curieux. Dans un sol maintenu en prairie pendant trente-trois ans (1856-1888), la teneur en azote s'éleva de 1,520 à 2,345 pour 1000, soit une augmentation annuelle moyenne de 58 kilogrammes par hectare.

Il est curieux de voir que ces expériences de grande culture, poursuivies pendant de longues années, donnent des résultats concordants. Dans tous les cas, la terre s'enrichit considérablement quand on la maintient en prairie.

Mais a-t-on bien le droit d'affirmer que cet enrichissement provient essentiellement des actions microbiennes? Oui, si le sol ne reçoit aucune fumure... Oui encore, si la quantité d'azote apporté par l'engrais est inférieure à celle exportée par les récoltes de foin.

La nature de la flore, indépendamment de la constitution des milieux, n'exerce-t-elle pas une action directe sur l'importance des gains ? Les prairies artificielles, qui sont à base de légumineuses, sont-elles plus efficaces que les prairies naturelles, où les graminées dominent ? Cette question se trouve implicitement résolue par une belle expérience de M. Pagnoul (1), et l'on peut dire que l'avantage est aux légumineuses, parce qu'elles ont la faculté d'utiliser l'azote atmosphérique.

Expérience de M. Pagnoul. — Six vases en grès imperméable, contenant 22 kilogrammes de terre, reçurent une même quantité d'engrais :

---

(1) *Annales agronomiques*, t. XVI, p. 250.

10 grammes de plâtre,
5 grammes de sang desséché,
1 gramme de sulfate d'ammoniaque.

Les deux premiers pots restèrent sans culture ; les autres portèrent un gazon de graminées ou bien du trèfle. On analysa séparément les récoltes, les eaux de drainage, la terre et les engrais, pour établir rigoureusement le bilan de l'azote. Les gains réalisés par l'ensemble, plantes et terres, après deux années (mars 1888-mars 1890) ont été les suivants :

	AZOTE GAGNÉ	
	PAR VASE (en gram.)	A L'HECTARE (en kilogr.)
Terre nue.	0,22	29
Terre avec gazon	2,97	294
Terre avec trèfle	6,82	904

Les excédents sont énormes : le gazon l'emporte de 265 kilogrammes sur la terre nue ; le trèfle accuse 875 kilogrammes par rapport au témoin et 610 kilogrammes par rapport au gazon.

Ainsi, la fixation directe de l'azote atmosphérique n'est pas contestable ; et du fait qu'elle cesse de se produire en milieu stérilisé, son caractère microbien ne saurait être mis en doute... Mais, pour en préciser le mécanisme, il fallait d'abord isoler les *agents spécifiques* qui la provoquent.

Agents spécifiques. — On connaît actuellement plusieurs espèces microbiennes : *Clostridium pasteurianum*, *Azotobacter chroococcum* et *agilis*, *Rhizobium leguminosarum* — capables d'assimiler directement l'azote libre de l'air. Ces bactéries ayant été cultivées dans des milieux artificiels, il devient relativement facile de préciser les conditions nécessaires à leur développement.

1° **Clostridium pasteurianum.** — Le *Clostridium pasteurianum* (fig. 19-B) a été découvert par M. Winogradsky (1). Il se présente au microscope, à l'état jeune, sous forme de bâtonnets cylindriques droits mesurant quelques millièmes de millimètres ; plus tard, la partie centrale se renfle (forme Clostridium) et la sporulation se produit bientôt : les spores, dont la faculté germinative persiste plusieurs années, ont des capsules gélatineuses triangulaires caractéristiques ; elles germent facilement dans une solution sucrée. Ce ferment est anaérobie ; il vit en symbiose avec deux bacilles aérobies (bacilles α et β) qui consomment des matières azotées, produisent de l'acide carbonique, et le protègent ainsi contre l'action directe de l'oxygène.

Pour cultiver le Clostridium, — qui ressemble beaucoup aux ferments butyriques — on emploie une solution nutritive contenant par litre, en grammes :

Phosphate de potasse.	1,00
Sulfate de magnésie	0,20
Chlorure de sodium	0,02
Sucre réducteur ou dextrose.	20 à 40

On ajoute ensuite un peu de craie et des traces de sulfates de fer et de manganèse. Si l'on ensemence avec des particules terreuses, il faudra avoir soin d'éliminer successivement les autres ferments par la méthode des cultures électives.

Au début, on favorise le développement des bacilles en ajoutant à la solution un peu d'azote organique ou de sulfate d'ammoniaque. Cela fait, il devient possible de cultiver le *Clostridium* en supprimant toute combinaison azotée. Dans le vide, on peut opérer sur pommes de terre et sur carottes.

En solution glucosée à 4 pour 100 — et dans un courant d'azote — une fermentation de *Clostridium* avait

(1) *Archives des sciences biologiques russes.*

absorbé 56 milligr. 3 d'azote après vingt-trois jours : il se forme, en même temps, des acides gras (*acétique* et *butyrique* surtout) et un peu d'alcools supérieurs. Comme le sucre fournit l'énergie nécessaire à l'activité du ferment, la richesse saccharine du milieu nutritif influe très sensiblement sur les gains d'azote combiné.

2° **Azotobacters divers.** — On connaît deux espèces principales d'Azotobacters : l'*Azotobacter chroococcum* (fig. 19-A) et l'*Azotobacter agilis*, qui ont été isolées par

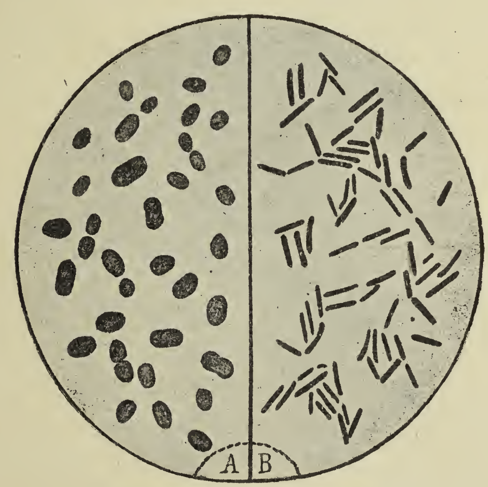


FIG. 19. — A) Azotobacter chroococcum ; B) Clostridium pasteurianum.

M. BEYERINCK. Les cultures peuvent se faire sur milieu gélosé additionné d'une solution nutritive contenant :

Eau distillée	100 gr.
Mannite	2,00
Phosphate de potasse	0,02

On ensemence ensuite avec des particules terreuses provenant d'un sol de 'ardin ou d'un sol ordinaire bien

ameubli (1). Presque toutes les matières sucrées, ainsi que l'amidon et les différents produits de la fermentation cellulosique, conviennent à la nutrition de ces microbes ; l'addition d'une petite quantité de composés azotés (peptones, asparagine, etc.) exalte toujours leur développement. Ces ferments sont aérobies. Ils mesurent parfois cinq *microns* (millièmes de millimètre). L'*Azotobacter agilis* se différencie nettement par la présence de cils nombreux qui lui permettent un déplacement plus rapide, une plus grande agilité.

A l'origine, Beyerinck supposait que les *Azotobacters* ne fixaient l'azote que s'ils étaient associés à d'autres microbes (*Aerobacter aerogenes, Bacillus radiobacter*, etc.) avec lesquels ils vivaient en symbiose ; mais les expériences plus récentes de MM. Gerlach et Vogel (2), ainsi que celles de M. Freudenreich, établissent de façon manifeste que ces ferments peuvent se passer d'auxiliaires (2).

3° **Microbes des nodosités.** — Les légumineuses cultivées ont l'heureux privilège d'utiliser pour leur développement l'azote atmosphérique. Cette importante faculté d'assimilation a été mise en lumière par les remarquables travaux d'Hellriegel et Wilfarth (3). On sait maintenant que les nodosités radiculaires de ces plantes contiennent d'innombrables bactéries — dénommées *Rhizobium leguminosarum* ou encore *Bacillus radicicola* — qui vivent en *symbiose* avec le trèfle, la luzerne, le lupin, etc. Les essais d'inoculation exécutés par M. E. Bréal (4), les merveilleux effets de la délayure de terre, ne laissent aucun doute sur l'utile intervention des microbes. Il serait trop long d'énumérer ici tous les travaux se rattachant à

(1) Les Azotobacters ne sont pas rares dans les sols cultivés. En arrosant un peu de terre avec une solution glucosée, on voit bientôt se former à la surface un voile caractéristique.

(2) *Bulletin du Ministère de l'Agriculture*, année 1906.

(3) *Annales agronomiques*, t. XIII, p. 130, et t. XV, p. 5.

(4) *Ibid.*, t. XV, p. 529.

cette question ; nous nous contenterons de rappeler les conditions de développement des bactéries radicicoles.

Ce sont surtout les recherches de LAURENT (1), de BEYERINCK, de PRAZMOWSKY — et celles plus récentes de M. P. MAZÉ (2) — qui nous ont fait connaître les caractères biologiques du microbe des nodosités. Dès que la bactérie (très fréquente dans le sol) se trouve en présence

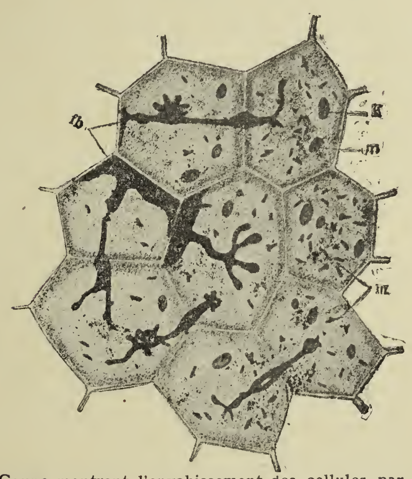


FIG. 20. — Coupe montrant l'envahissement des cellules par le microbe des nodosités : *fb*, forme bactéroïde ramifiée et tissu bactéroïdien ; *k*, kystes et noyaux ; *m*, bactéroïdes simples et forme bacillaire.

des poils radiculaires d'une légumineuse, elle pénètre à l'intérieur de cet organe, se multiplie et se propage ensuite — en vertu de ses propriétés chimiotaxiques — jusqu'aux cellules corticales où elle constitue une sorte de *tissu bactéroïdien* qui s'étend parfois dans plusieurs cellules voisines (fig. 20).

---

(1) *Annales de l'Institut Pasteur*, année 1891.
(2) *Ibid.*, années 1897 et 1898.

Au début, le microbe affecte la *forme bacillaire ;* il vit en parasite et la plante souffre : elle a faim d'azote... Plus tard, la *forme bactéroïde* fait son apparition : les petits bâtonnets deviennent plus rares, et l'on observe de nombreux organismes plus gros (bactéroïdes) dont quelques-uns sont en Y et en T. Nous arrivons ainsi à la seconde phase. Avec elle, la *vie parasitaire* cesse tandis que la *vie symbiotique* commence. Les diastases protoplasmiques digèrent les bactéroïdes, et ce sont les produits de cette digestion — produits très riches en azote — que la plante hospitalière met à profit. Dans les cultures en milieux artificiels (bouillon de haricot sucré, infusion de feuilles de papilionacées avec gélatine, asparagine et sucre), c'est la forme bacillaire qui domine.

La virulence du microbe des nodosités, comme l'ont reconnu MM. Nobbe et Hiltner, peut varier d'une légumineuse à l'autre suivant que le chevelu de son système radiculaire offre plus ou moins de résistance à la pénétration. Il faut aussi tenir compte de la spécificité microbienne ; certaines bactéries n'entrent pas dans le poil radiculaire, parce que leur trop faible sécrétion diastasique est inapte à résorber la membrane pileuse ; d'autres, après pénétration, sont détruites par les noyaux cellulaires. D'où il ressort : *que les plantes en bon état végétatif se défendent très bien contre les microbes de moindre virulence et ne produisent des nodosités qu'avec les fortes bactéries*. En présence des nitrates, il n'y a presque jamais formation de bactéroïdes (1).

Toutes ces données permettent d'expliquer ainsi le mécanisme de l'assimilation de l'azote de l'air. « Au début, quand le microbe vit en parasite, la légumineuse lui pro-

(1) J'ai moi-même constaté, en 1897, quand j'étudiais l'assimilation des humates par le trèfle, la forte atténuation des nodosités. Dans les milieux riches en substances humiques azotées assimilables, dans les sols qui nitrifient avec intensité, j'ai observé le même fait pour d'autres légumineuses — ce qui m'a permis d'écrire que *l'absorption de l'azote atmosphérique, parfois, devait être subordonnée à l'assimilation de l'azote du sol. Je la considère alors comme essentiellement complémentaire.*

cure les aliments azotés et carbonés dont il a besoin. Plus tard, lorsque la *forme bactéroïde* apparaît, le processus vital change d'allure : les bactéries assimilent l'azote atmosphérique et ne demandent au végétal que des aliments hydrocarbonés. A ce moment, la virulence s'accentue et la plante lutte contre l'envahisseur ; son action se porte principalement sur les bactéroïdes affaiblis qui sont digérés par les diastases végétales. Les matières albuminoïdes ainsi dissoutes entrent alors dans la circulation et concourent au développement de la plante hospitalière, qui en tire grand profit. »

Cette lutte entre le végétal et le microbe provoque une recrudescence d'activité dans les fonctions d'assimilation. Je rendrai compte dans un autre ouvrage (*Chimie végétale*) des expériences que j'ai effectuées et desquelles il résulte que les légumineuses cultivées en milieu normal, toutes choses étant égales d'ailleurs, assimilent une proportion d'acide carbonique d'autant plus élevée que l'action symbiotique est elle-même plus intense. En milieu stérilisé, l'allure de la fonction chlorophyllienne dépend surtout de la richesse du sol (1).

Applications pratiques. — D'après ce que nous venons de dire, la fixation de l'azote atmosphérique ou sidéral — autrement dit la *sidération* — comporterait en fait, dans les conditions naturelles, deux processus généraux : elle peut s'effectuer *directement*

(1) Une théorie nouvelle, sur la fixation de l'azote libre, a été formulée par M. Th. Jamieson, directeur de la station agronomique d'Aberdeen (Écosse). D'après l'auteur, les plantes assimileraient directement l'azote atmosphérique grâce à des organes appropriés : poils, glandes, etc..., où l'on décèle aisément la présence des matières albuminoïdes produites par une fonction physiologique spéciale, analogue à la fonction chlorophyllienne. Cette ingénieuse hypothèse n'a pas encore reçu la consécration expérimentale.

ou par *symbiose*. Dans le premier cas, les microbes vivent seuls : l'azote qu'ils empruntent à l'atmosphère sert à leur développement ou à leur reproduction, et la terre s'enrichit ensuite de leurs propres dépouilles... Dans le second cas, au contraire, l'agent microbien travaille pour le compte d'un être vivant qui lui offre l'hospitalité.

Mais quel que soit le *modus vivendi*, les ferments fixateurs d'azote ont toujours besoin de ces matières organiques ternaires assimilables dont ils ne peuvent réaliser la synthèse intégrale. Ils vivent en quelque sorte comme des champignons *parasites* ou *saprophytes ;* et c'est seulement quand ils exaltent la végétation des plantes hospitalières, par des apports d'azote, que nous percevons les différences caractéristiques entre le parasitisme et la symbiose. En cours normal d'évolution, ils empruntent et ils rendent : leur parasitisme a du bon si les intérêts sont bien payés. Que le microbe considéré travaille seul ou en association avec des *bactéries*, des *algues*, des *mousses* et des *plantes supérieures*, son travail nous sera toujours profitable à un degré quelconque.

Ainsi, bien que l'on ne connaisse encore qu'un petit nombre de ferments capables d'assimiler l'azote libre, ce que nous savons déjà de quelques espèces connues : *Clostridium pasteurianum*, *Azotobacters*, *Microbes des nodosités*, montre nettement le caractère général du phénomène. Nous pouvons donc admettre : que la sidération est l'œuvre de microbes spécifiques qui se développent isolément, dans un milieu de culture approprié, ou qui vivent en symbiose avec d'autres végétaux leur fournissant l'utile complément des matériaux alimentaires dont ils ont besoin.

De fait, le *processus symbiotique* — qui est de beaucoup le plus général et le plus naturel — apparaît

plutôt comme une nécessité accidentelle. Le microbe de nodosités : le *Rhizobium leguminosarum* ou *Bacillus radicicola*, fixe l'azote, sans le secours d'aucune plante hospitalière, quand on le cultive dans un bouillon de haricots additionné de quelques centièmes de sucre (P. Mazé) ; il se comporte alors de la même façon que le *Clostridium* ou l'*Azotobacter*, et l'on peut supposer que s'il trouvait dans le sol des liquides appropriés, il vivrait librement sans rien emprunter aux légumineuses. Voilà pourquoi la symbiose nous apparaît comme une sorte d'accident dans l'évolution microbienne : elle est, à vrai dire, la conséquence de la lutte pour la vie.

Suivant les conditions de milieu, les ferments fixateurs d'azote agiront directement ou par symbiose. En milieu artificiel, c'est l'action directe qui se manifeste, dans tous les cas, et la quantité de sucre consommé semble proportionnelle à l'enrichissement des solutions en azote. Pour les différents microbes, on trouve, en effet, par gramme de sucre consommé :

	GAIN D'AZOTE (en milligram.)
Culture de *Clostridium*	1,3 à 1,7
Culture d'*Azotobacter*	8 à 9
Culture de *Rhizobium*	9 à 11

On remarquera combien est inégale la virulence de ces diverses bactéries. La consommation des matières hydrocarbonées paraît très grande, puisqu'il faut au moins cent parties de sucre pour une partie d'azote. Si la terre devait fournir tout le carbone nécessaire à la vie de ces ferments, les substances humiques subiraient une dégradation excessivement rapide, et l'enrichissement azoté correspondrait alors à un tel degré d'appauvrissement en humus que

l'opération risquerait de devenir désavantageuse pour la culture.

Le *processus symbiotique*, fort heureusement, obvie à cet inconvénient : les gains d'azote, dans les prairies surtout, marchent de pair avec l'enrichissement du sol en humus. Ce sont les débris végétaux, les résidus des récoltes, qui accroissent ainsi la dose de carbone organique.

La *symbiose* ne s'effectue pas seulement avec les légumineuses ; elle peut se produire aussi avec des végétaux inférieurs. A la suite des intéressantes recherches effectuées par MM. Schlœsing fils et Laurent (1), on supposait que les algues pouvaient assimiler directement l'azote de l'air... A la vérité, elles enrichissent bien la terre, mais par action indirecte ou détournée.

Les essais de M. Kossowitsch nous ont appris, en effet, que les cultures pures de *Chorella vulgaris* (algue) n'accusent aucun gain d'azote. Il en est de même pour d'autres espèces : *Nostoc, Cystococcus, Ulothrix, Schizothrix,* etc., qui refusent de pousser dans des solutions dépourvues de nitrates. Au contraire, en présence des bactéries fixatrices d'azote, et avec des liquides nutritifs sucrés, ces plantes se développent normalement, vivent en symbiose et enrichissent sensiblement le milieu de culture. L'influence du sucre est des plus évidentes ; M. Kossowitsch a trouvé (2) :

	AZOTE FIXÉ (EN MILLIGR.)	
	avec sucre	sans sucre
Nostoc et bactéries	24,4	8,8
Cystococcus et bactéries. . . .	8,1	3,1
Stichococcus et bactéries . . .	2,7	2,3

Ainsi, le caractère symbiotique du phénomène n'est

(1) *Annales de l'Institut Pasteur*, année 1892.

(2) *Botan. Zeit.*, 1894, p. 97.

point douteux : les algues enrichissent le sol, toutes pro portions gardées, à la façon des légumineuses.

Étant donné le prix relativement élevé des engrais azotés, on s'est demandé s'il n'y aurait pas possibilité de mettre à profit les facultés microbiennes. Avec le système Solari, grâce à l'introduction des prairies artificielles dans l'assolement, le sol se trouverait remonté en azote périodiquement, et on pourrait ensuite le cultiver par le seul emploi des engrais phosphatés et potassiques. Sans vouloir pousser l'exclusivisme trop loin, il semble bien que cette méthode présente de sérieux avantages : avec elle, le nitrate de soude ne s'emploierait guère qu'à titre de médicament, pour stimuler opportunément la végétation languissante, en suppléant à l'insuffisante capacité nitrifiante de la terre.

On voulait mieux faire ! Des agronomes cherchèrent à produire industriellement des microbes pouvant fixer l'azote atmosphérique ou rendre plus assimilables les matières azotées du sol. La *nitragine* (de MM. Nobbe et Hiltner) et l'*alinite* (de M. Caron, d'Ellenbach) devaient remplir ce rôle important... Mais il convient de reconnaître que les essais de fertilisation du sol par voie microbienne n'ont pas donné les résultats qu'on pouvait espérer. Si, dans les sols pauvres en bactéries, ces ensemencements agissent favorablement, dans les terrains cultivés, où les microbes pullulent, leurs effets restent nuls ou insignifiants. Aux États-Unis, on fait encore de multiples expériences, et il convient d'en attendre les résultats avant de se prononcer contre une tentative de fertilisation sur laquelle on avait fondé de grands espoirs.

Puisque l'emploi des microbes aboutit souvent à des insuccès, il pouvait être intéressant de recher-

cher si la culture avec des algues ne serait pas meilleure. C'est le second côté de la question... La flore microbienne du sol, en général très riche, peut ne pas être influencée par des apports d'*alinite* ou de *nitragine ;* mais rien ne prouve que des plantes réfractaires à la symbiose, associées avec des algues, n'utiliseraient pas indirectement l'azote atmosphérique... Sur ce point, les expériences de MM. Bouilhac et Giustiniani (1) sont des plus concluantes ; des cultures de sarrasin faites avec différents mélanges symbiotiques ont donné, en terrains pauvres d'humus :

	RÉCOLTE SÈCHE (en grammes)	AZOTE DOSÉ (en milligr.)
Sarrasin seul (témoin)	1,10	29,24
Sarrasin avec mélange symbiotique	3,75	71,35
Sarrasin avec algues et bactéries	7,10	127,27

Avec le maïs, qui est une plante très avide d'azote, les résultats sont à peu près de même sens.

Quelle que soit la valeur de tous ces essais, il semble bien difficile qu'ils puissent recevoir une sanction véritablement pratique. Les algues communes, au même titre que les microbes et nombre d'autres cryptogames, sont très abondamment répandues... Il y a fort longtemps qu'elles travaillent, à notre insu, sans jamais nous avoir dispensés, pour cela, des apports d'engrais. Peut-être objectera-t-on qu'il serait toujours utile d'exalter leur activité ? Oui, sans doute, dans nos cultures de laboratoire où nous sommes maîtres du milieu, mais dans nos champs... Et voilà ce qui me fait dire, en terminant ce chapitre : « Le règne des bactéries est aussi vieux que la vie, celui des engrais n'est pas encore près de finir, et la sagesse agricole veut que nous tirions le meilleur parti de l'un et de l'autre sans rien exagérer. »

(1) C. R. de l'Académie, année 1903.

VI

LA CHIMIE DU SOL

C'est dans le sol que se préparent, par une sorte de *digestion chimique,* les solutions nutritives destinées à l'alimentation des végétaux. Une activité constante s'y manifeste, en effet, sous l'influence combinée des ferments qui dégradent l'humus et des composés divers qui circulent dans les eaux mouillant les particules. Pour comprendre ce grand travail d'élaboration, il est indispensable de bien connaître l'origine, la nature et les propriétés générales des matériaux qui composent la terre arable ou qui lui ont donné naissance. A ce titre, les notions que nous avons acquises sont des plus précieuses; mais si notre étude devait s'arrêter là, nous n'aurions qu'une imparfaite idée de la *chimie agrologique.*

Il existe, en fait, de très sensibles différences entre le *sol primitif* et les *terrains cultivés.* Les modifications profondes que ceux-ci ont subies ne sont pas seulemen l'œuvre du temps : elles dépendent aussi, dans une large mesure, des façons culturales et de la manière de cultiver.

Le travail du sol exaltant l'*activité chimique,* on comprend très bien que les agriculteurs qui défrichent des *terres vierges,* longtemps abandonnées à la végétation spontanée, puissent obtenir d'abondantes récoltes, des années durant, sans aucun apport de ma-

tières fertilisantes. Mais, à la longue, l'épuisement se produit, et il faut alors modifier le système de culture, pratiquer les assolements, recourir enfin à l'emploi des amendements et des engrais. Si l'on examinait, à chaque étape, la constitution chimique du terrain, on ne manquerait pas d'apercevoir les différences fondamentales qui caractérisent un *sol vierge*, un *sol épuisé*, un *sol fertilisé* ou artificiellement enrichi... Et ces utiles observations, appuyées sur les notions scientifiques modernes, donneraient à l'*agrologie* toute la précision et l'ampleur désirables.

Nous allons essayer de reconstituer cette *évolution chimique du sol* à partir du moment où la *masse rocheuse* inerte, fragmentée et pulvérisée, reçut en elle le premier germe de vie : la frêle plante qui venait l'envahir.

I. — Aperçu général.

Les roches originelles, désagrégées physiquement, donnèrent naissance à un sol essentiellement minéral dont la composition, d'abord semblable à celle des masses rocheuses, fut ensuite modifiée par l'entrée en jeu des actions désagrégeantes et sédimentaires. Le premier travail de pulvérisation mit en liberté des espèces minérales de densité différente que les eaux charrièrent pour les abandonner, au cours de leur voyage, en des endroits éloignés. Une sorte de sélection naturelle se produisit ainsi. Les fragments restés sur place, au même titre que les dépôts, subirent ensuite une décomposition chimique partielle qui aboutit à la production des *éléments dérivés*. Que les roches sédimentaires aient pris naissance avant ou après ce travail de dégradation, que les actions décompo-

santes et la sédimentation se soient manifestées simultanément ou consécutivement, cela présente moins d'intérêt au point de vue agricole qu'au point de vue géologique. Le plus important pour nous est de savoir par quel mécanisme la terre végétale a pris naissance et comment elle a pu constituer, dans la suite, d'importantes réserves alimentaires actives ou assimilables.

Sol primitif et sol végétal. — Étant donné qu'il existe une masse énorme de sédiments argileux, siliceux et calcaires, on pourrait admettre qu'il se forma d'abord un *sol originel* — caractérisé par la présence exclusive de débris rocheux — puis un *sol primitif* où se rencontrent des composants dérivés souvent mélangés à des éléments originels. Plus tard, quand les conditions de milieu permirent l'évolution des êtres organisés, les végétaux s'emparèrent de ce terrain, l'enrichirent de leurs dépouilles et le transformèrent en *sol végétal.*

Ces divers types de sols, parfaitement distincts, marquent autant d'étapes successives. Et si nous sommes en droit de les nommer *terrains* — au sens agricole du mot — on voit tout de suite que la *terre végétale* se différencie par la présence constante de l'*humus,* de l'*azote* et de la *matière noire.*

Le sol primitif. — Sous sa première forme, le sol originel ne pouvait être que l'image fidèle de la roche mère, avec la pulvérulence en plus. Suivant la nature des masses rocheuses qui l'avaient engendré, il contenait plus ou moins d'éléments *quartzeux*, *feldspathiques* et *ferro-magnésiens.* Les espèces minérales et les composants chimiques : silice, alumine, fer, chaux, magnésie, potasse, soude, etc., s'y trouvaient surtout à l'état *passif.* Physiquement, à cause de l'absence des éléments argileux, ces

sols étaient presque dépourvus d'agrégats terreux proprement dits. Il n'y avait, en somme, que des particules rocheuses associées à des poussières plus fines transportables par les eaux et par les vents. Les landes siliceuses, les déserts sableux arides offrent de semblables propriétés.

Bientôt, les hydradations et les décompositions chimiques se manifestèrent sur les éléments ténus et sur les minéraux peu résistants : le *sol originel* fit place au *sol primitif*. Dès lors, les caractères physiques changent. A mesure que se poursuit la *kaolinisation*, la terre prend corps : les fines particules, agglutinées par les colloïdes, forment de véritables conglomérats. Un seul élément manque à ce terrain : l'humus, les matières organiques qui caractérisent le *sol du second degré*.

Le sol végétal. — Voici que la vie apparaît. Les végétaux envahissent alors le sol primitif, y meurent, s'y décomposent lentement, et la matière organique vient se joindre aux composants minéraux originels ou dérivés. A dater de ce moment, la terre meuble se prête à de nouvelles transformations : elle devient apte à constituer des réserves actives, de la *matière noire;* et c'est parce que les matériaux nécessaires à la production s'y trouvent réunis que nous sommes désormais en présence de la *terre végétale* proprement dite. Formée par un mélange de composants minéraux et organiques, cette terre possède toutes les propriétés inhérentes au *sol primitif* auxquelles viennent s'ajouter celles de l'humus, élément de correction et de conservation. La nature de l'enduit qui recouvre et agglutine les particules n'est plus essentiellement *argileuse :* les matières humiques dérivées participent à sa constitution, de telle sorte que chaque grain terreux possède un revêtement *humo-argileux* plus ou moins complexe.

Ainsi, l'apparition des matières organiques donne à la terre de nouvelles propriétés. De fait, elles favorisent l'activité chimique du sol, non seulement

parce qu'elles constituent une puissante source de gaz carbonique, mais aussi en raison de la part qu'elles prennent dans la constitution des réserves nutritives. Quelle que soit l'intensité des actions chimiques, l'humus s'oppose en effet à l'entraînement de l'acide phosphorique et de la potasse... Bien plus, il fait même obstacle à certaines actions rétrogradantes; et c'est grâce à lui, on peut le dire, que le travail d'élaboration devient sûrement profitable.

Voilà pourquoi tout *sol végétal* profond et bien constitué possède une réelle valeur culturale.

Activité chimique du sol. — On sait que l'activité chimique du sol est une des conditions essentielles de la fertilité. Dans un milieu riche, mais *inactif*, au sens absolu du mot, les principes fertilisants demeurent inutilisables tant qu'ils sont frappés de passivité ou d'inertie. Il importe donc que l'azote, l'acide phosphorique, la potasse, la chaux, puissent évoluer normalement et entrer en circulation pour subvenir aux impérieux besoins des végétaux. Les ferments nitrificateurs se chargent, quand les circonstances sont favorables à leur développement, de rendre assimilables les matières azotées. Mais c'est à l'eau saturée d'acide carbonique qu'incombe surtout la libération des éléments minéraux; et comme ce gaz provient de la dégradation des matières organiques — sous l'influence des microbes — il s'ensuit que la *capacité digestive* de la terre est étroitement subordonnée à ses propriétés biologiques.

Peut-on mesurer approximativement l'activité chimique du sol? De prime abord, cela paraît bien difficile à cause des phénomènes réversibles et des actions contraires qui ont pour effet d'immobiliser ou de précipiter une partie des matériaux préalablement rendus solubles. Seule, l'analyse des gaz, de l'eau

et des enduits enveloppant les agrégats terreux, fournit une solide base d'appréciation au point de vue comparatif.

Les gaz du sol. — Les espaces lacunaires sont occupés par de l'eau et de l'air. Quand on étudie la composition de l'atmosphère du sol (1), on est frappé de la proportion d'acide carbonique qu'elle contient à certains moments. Les déterminations faites par différents auteurs ont donné :

	Pour 100 volumes de gaz extrait	
	Acide carbonique	Oxygène
a) D'après Boussingault et Lewy :		
Sol sablonneux, en vigne. . . .	1,06	19,72
Sol de luzernière, à 0m,30. . . .	0,80	20,04
Sol de forêt, à 0m,35	0,87	19,61
Sol de prairie	1,79	19,41
b) D'après M. Schlœsing :		
Pré du Pontel		
à 0m,15.	0,41	20,57
à 0m,35.	0,72	20,14
à 0m,50.	1,64	18,36
c) D'après M. Mangin :		
Jardin du Luxembourg		
à 0m,50.	0,61	20,02
à 0m,80.	0,88	20,03
Jardin anglais (non remué)		
à 0m,45.	1,04	19,79
à 0m,90.	1,05	18,14

(1) Pour extraire l'air du sol, on enfonce une sonde à la profondeur voulue, puis on recueille les gaz au moyen d'un aspirateur.

La proportion d'azote, dans presque tous les cas, est comprise entre 79 et 80 °/₀. Les variations portent principalement sur l'oxygène qui tombe parfois à 10 °/₀ dans les sols de prairie (M. SCHLŒSING fils). Bien des causes peuvent modifier la composition de l'atmosphère du sol : fumures organiques, façons culturales, exposition, conditions climatériques, etc.

RISLER en a donné un bel exemple pour une terre de jardin de Calèves (Suisse); il obtint en 1862-73 :

	ACIDE CARBONIQUE POUR 100	
	Sol pris à $0^m,25$	Sol pris à 1 mètre
Température minima . . .	0,37	0,57
Température maxima . . .	0,65	1,74
Vents faibles	0,57	1,29
Vents forts.	0,46	1,14

On voit que le taux d'acide carbonique, pour un milieu donné, augmente généralement avec la profondeur et la température; il diminue avec l'intensité des vents et de la pluie qui provoquent un déplacement sensible des masses gazeuses.

Il importe de retenir que l'atmosphère du sol, étant riche en acide carbonique (on sait que l'air normal en contient seulement 0,0003 en volumes), constitue une importante réserve pour la saturation des eaux superficielles qui se tiennent toujours en équilibre de tension avec le milieu ambiant. Ces eaux saturées réagissent sur les composants minéraux et rendent ainsi possibles de nombreuses transformations chimiques.

Les eaux du sol. — Au contact direct des particules terreuses, l'eau se charge de composés divers que l'analyse nous fait utilement connaître.

A titre de renseignement, voici la composition de quelques liquides extraits du sol par l'ingénieuse méthode de déplacement imaginée par M. Schlœsing père. D'après ce savant, un litre d'eau renfermerait *en milligrammes :*

SUBSTANCES DOSÉES	TERRE de BOULOGNE		TERRE de NEAUPHLE	
	Sans engrais	Avec engrais (1)	Rien	Traitée (2)
Matières organiques	37,5	89,9	36,8	*54,7*
Acide nitrique	305,0	332,4	362,0	*428,0*
Chlore	7,4	6,7	35,2	30,3
Acide sulfurique	57,9	74,5	39,0	28,9
Acide phosphorique	0,8	2,8	0,5	0,7
Silice	29,1	32,0	22,6	40,5
Chaux	264,2	227,2	300,9	*538,0*
Magnésie	13,5	20,2	19,6	32,3
Potasse	*6,2*	*156,8*	*4,8*	*5,4*
Soude	7,8	14,3	29,8	37,8
Totaux	730,1	938,8	851,2	1196,6

(1) Cette terre avait été engraissée par du nitrate de potasse, des cendres et du terreau.

(2) On avait fait passer, du 28 mars au 9 avril, un courant d'air contenant 13 pour 100 d'acide carbonique.

Ces dosages sont particulièrement instructifs ; ils nous montrent non seulement la réalité de l'action dissolvante des eaux, mais aussi leur inégale richesse en matière sèche et en principes fertilisants. L'influence des fumures est des plus manifestes : dans la terre de Boulogne, après addition d'engrais potassiques, la dose de potasse passe de *6,9* à *156,8*. L'étude des eaux de drainage provenant de terres avec ou

sans engrais fournit de semblables résultats. Enfin, l'action mobilisante de l'acide carbonique sur la terre de Neauphle-le-Château (Seine-et-Oise) ressort manifestement : ce gaz dissout les carbonates terreux, et c'est pour cela que la teneur en chaux et en magnésie augmente sensiblement. Nous constatons aussi un accroissement notable pour l'acide nitrique (428 milligrammes au lieu de 362) et pour les matières organiques (54,7 contre 36,8). Contrairement à ce que l'on observe d'ordinaire dans la désagrégation des roches, la mobilisation des alcalis n'est pas très apparente (1). En tout cas, il convient de remarquer que l'action dissolvante de l'eau ne saurait être contestée, et c'est là surtout ce que nous voulions établir.

Eaux de drainage. — L'étude des eaux de drainage fournit de très utiles indications. Et c'est pourquoi nous mentionnerons les intéressantes recherches effectuées à Rohamsted par Lawes, Gilbert, Warington et Frankland ; elles montrent en effet, de façon indiscutable, que les eaux s'égouttant des terres inégalement fumées accusent toujours une composition différente. On y a dosé par mètre cube, *en grammes :*

---

(1) En réalité, la proportion de potasse rendue soluble a été plus élevée ; mais nous pensons, conformément à nos expériences, que ce corps a dû être fixé par les matières humiques, et en partie par l'argile ; c'est pour cela, selon toute vraisemblance, que nous constatons un supplément de matières organiques et d'acide nitrique dans les eaux du sol traité.

COMPOSITION DES EAUX DE DRAINAGE DE ROTHAMSTEDT

FUMURES ANNUELLES PAR HECTARE	Matières dissoutes	Chaux	Magnésie	Potasse	Soude	Chlore	ACIDES		AZOTE	
							Sulfurique	phosphorique	ammoniacal	nitrique
Sans engrais (moyenne)	246,4	98,1	5,1	1,7	6 0	10,7	24,7	0,63	0,12	3,0
Fumier (35,000 kil.)	476,1	147,4	4,9	5,4	13,7	20,7	106,1	»	0,16	16,1
Sels ammoniacaux (448 kil.) . . .	406,9	154,1	7,4	1,9	7,1	32,0	44,4	1,44	0,08	13,9
Sels ammon. (448 kil.) et engrais minéraux: Superphosphate. . .	425,9	165,6	7,3	1,0	6,6	31,6	54,3	1,66	0,17	15,3
Sels ammon. (448 kil.) et engrais minéraux: Sulfate de soude . .	530,9	191,6	6,6	2,7	24,6	30,9	96,7	1,26	0,30	15,1
Sels ammon. (448 kil.) et engrais minéraux: Sulfate de potasse. .	544,3	201,4	9,3	3,3	6,1	36,6	86,9	1,09	0,16	17,4
Sels ammon. (448 kil.) et engrais minéraux: Sulfate de magnésie .	598,6	226,7	11,6	1,0	5,6	39,4	99,7	1,01	0,09	19,2
Sels ammon. (448 kil.) et engrais minéraux: Mélange minéral . .	585,3	201,1	7,9	5,3	14,3	24,6	123,9	1,54	0,11	24,2
Nitrate (616 kil.) et engrais minéraux.	423,9	118,1	5,9	4,1	56,1	12,0	41,0	»	0,27	18,4
Mélange minéral	326,0	124,3	6,4	5,4	11,7	11,1	66,3	0,91	0,13	5,4
Sans engrais.	286,7	117,1	5,3	2,4	5,1	31,4	21,9	0,91	0,09	7,0

De l'examen des nombres consignés dans ce tableau, il ressort : *que l'action dissolvante des eaux ne se manifeste pas à un égal degré sur tous les éléments constitutifs du sol.* Parmi les oxydes métalliques, c'est la *chaux* qui disparaît en plus forte proportion ; parmi les composés métalloïdiques, l'acide sulfurique, le chlore et l'acide nitrique sont facilement entraînés. Les pertes d'acide phosphorique et de potasse sont excessivement faibles.

Considérés dans leur ensemble, ces résultats sont de même sens que ceux obtenus par M. Schlœsing. Si l'on veut bien admettre qu'un hectare de terre, sous nos climats, laisse couler annuellement 2000 tonnes d'eau environ, un simple calcul permet d'établir que les pertes s'élèveraient en moyenne :

à 30 kilos pour l'azote,
à 150 kilos pour l'acide sulfurique,
à 350 kilos pour la chaux,
à 3 ou 4 kilos pour l'acide phosphorique,
à 5 ou 10 kilos pour la potasse.

Dans les sols pauvres en calcaire, où les composés potassiques se transforment difficilement en carbonates l'entraînement de la potasse devient parfois très sensible. Ainsi que je l'ai reconnu en 1894, les terres granitiques douées d'une *capacité nitrifiante* moyenne abandonnent à l'eau une forte proportion de salpêtre. Après chaulage, le nitrate de chaux apparaît, et la dose de potasse dissoute diminue considérablement. J'ai trouvé en effet :

	Par litre d'eau de drainage (en grammes)		
	Acide azotique.	Chaux.	Potasse.
Terre de Trougemont (Vosges) :			
a) sans calcaire.	0,587	0,092	0,420
b) chaulée (2 %)	0,236	0,426	0,080
Terre de la Guadeloupe :			
a) peu calcaire	0,189	0,040	0,096
b) assez calcaire	0,720	0,486	»

Cette expérience est doublement intéressante : elle nous montre, d'une part, que la composition alcaline des eaux de drainage dépend surtout de la nature et de l'activité chimique du sol, et plus spécialement de la présence du calcaire ; elle nous apprend, d'autre part, *que la chaux peut être un puissant agent de conservation de la potasse,* parce qu'elle restreint parfois l'appauvrissement de la terre en cet élément (1).

Les enduits de revêtement. — Chaque particule terreuse, dans les sols cultivés, est revêtue d'un enduit de nature plus ou moins complexe où nous trouvons surtout de la matière noire et de l'argile coagulée. Pour en déterminer la constitution, je procède au décapage de la terre ou de ses composants sableux et argileux — séparés par l'analyse physique — au moyen d'une solution d'acide oxalique, ainsi que je l'ai dit d'autre part.

En traitant 100 grammes de terre par une solution contenant 20 grammes d'acide oxalique, j'ai obtenu des liquides assez riches en azote, en acide phosphorique, en potasse, etc... La proportion des principes fertilisants ainsi entraînés est loin d'être négligeable. J'ai trouvé en effet :

	POUR 100 DE TERRE TRAITÉE		
	Azote	Acide phosphor.	Potasse
Terre de Grignon . . .	0,046	0,070	0,064
Terre de la Guadeloupe.	0,081	0,013	0,023
Alluvion de la Garonne.	0,052	0,013	0,037
Terre de Marmilhat . .	0,053	0,440	0,162
Terre de la Creuse . .	0,100	0,112	0,068
Terre des Vosges . . .	0,176	0,047	0,131

(1) A cause de la grande valeur de l'azote, on s'est beaucoup préoccupé de limiter l'entraînement des nitrates : soit en restrei-

L'acide oxalique, qui est un décapant énergique, n'exerce à vrai dire qu'une action insignifiante sur les éléments originels. Par contre, il attaque les composants dérivés, les *enduits* et la *matière noire.* Je suppose que ce réactif convenablement employé permettrait de déterminer, avec plus d'exactitude que les acides forts, la *richesse disponible* d'un sol donné. Tous les matériaux sableux, séparés de la terre par lévigation simple, abandonnent des principes fertilisants quand on les traite par l'acide oxalique.

La formation des enduits est sous la dépendance des actions désagrégeantes et précipitantes ; nous en reparlerons bientôt.

Les actions chimiques. — Pour comprendre le mécanisme général des actions chimiques — dont le but principal est *la production, la mise en œuvre et la conservation des réserves alimentaires* — il faut d'abord les considérer indépendamment les unes des autres, en partant d'un milieu essentiellement minéral *(sol primitif)* ou essentiellement organique *(sol tourbeux).* Dans ces conditions, on ne tarde pas à se rendre compte — abstraction faite des actions désagrégeantes — que les principales modifications portent sur les *éléments dérivés* et plus spécialement sur ceux de nature colloïdale dont la constitution se modifie sans cesse. Toutefois, l'étude chimique des sols en place ne saurait fournir, sur la nature de ces

---

gnant l'infiltration de l'eau, soit en mettant à profit la faculté assimilatrice des plantes à développement rapide. P. P. Dehérain, qui s'est adonné passionnément à ce genre d'études, préconisait surtout la pratique des *cultures dérobées* d'automne qui couvrent le sol pendant l'arrière-saison, évaporent la presque totalité de l'eau tombée et fixent une grande partie des nitrates contenus dans la terre.

modifications, des renseignements précis, rigoureux, absolus. Nous arriverons plus sûrement au but en essayant de refaire en petit ce que la nature fait en grand.

Si nous partons de la poussière granitique et de la matière végétale, nous reproduirons approximativement la *terre type* avec ses composants *originels* et *dérivés*. En procédant ensuite par éliminations successives, en laissant de côté les matériaux inertes ou gênants, on peut, avec plus de facilité, saisir le sens des multiples actions *progressives* et *régressives* qui dominent toute la chimie du sol.

Les *actions biologiques* ou *réductrices* ayant fait l'objet d'une étude spéciale, il convient d'examiner successivement dans ce chapitre :

1° *les actions désagrégeantes,*
2° *les actions dissolvantes,*
3° *les actions rétrogradantes,*
4° *les actions mobilisantes.*

Tous les phénomènes qui tendent vers la dégradation, la simplification et la dissolution des composés chimiques, sont de *sens progressif ;* les autres, au contraire, sont de *sens régressif.*

II. — Actions désagrégeantes.

Nous avons vu comment l'eau chargée d'acide carbonique réagit sur les espèces minérales attaquables, désagrège les composés silicatés et provoque la formation des *éléments dérivés :* argile, calcaire, silice gélatineuse, etc. (1), qui déterminent l'agglutination

---

(1) Voir *Désagrégation des roches,* travail de décomposition chimique (pp. 12 et suivantes).

des particules. Comme ces actions se manifestent encore dans nos terrains cultivés, il n'est pas inutile d'en indiquer le sens réel et d'en montrer aussi les conséquences.

Démonstration expérimentale. — On peut, au laboratoire, reproduire expérimentalement une sorte de *sol primitif* en soumettant à l'action lente de l'acide carbonique une fine poussière granitique immergée dans l'eau distillée. Après quelques mois d'expériences, on obtient un produit riche en *argile*, en *silice hydratée* et en *carbonates* alcalins et terreux. C'est la répétition des expériences d'Ebelmen et de Müller.

Mais que se passe-t-il en fait ?

Nous avons, d'une part, notre mélange granitique formé de *quartz*, de *mica* et de *feldspath ;* de l'autre, de *l'air*, de *l'eau* et de *l'acide carbonique.*

Comme le quartz est inattaquable, l'action chimique se porte sur les minéraux silicatés, et particulièrement sur le feldspath. Pour fixer les idées, supposons le feldspath isolé des autres éléments : si nous avons affaire à de *l'orthose* (silicate double d'alumine et de potasse), il va se former de *l'argile* (silicate d'alumine hydraté), de la *silice gélatineuse* et du *carbonate de potasse.* En assignant aux corps en présence les formules suivantes :

Orthose : $6\,(SiO^2)\,Al^2O^3,\,K^2O$
Argile : $2\,(SiO^2)\,Al^2O^3,\,2\,(H^2O)$
Silice hydratée : $SiO^2,\,n\,(H^2O)$
Carbonate de potasse : CO^3K^2

et en admettant une transformation intégrale, la réaction peut s'écrire :

$$\left.\begin{matrix} 6\,(SiO^2)\,Al^2O^3,\,K^2O \\ +\,4\,(CO^2) \\ +\,n\,(H^2O) \end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix} 2\,(SiO^2)\,Al^2O^3,\,2\,(H^2O) \\ +\,4\,(SiO^2)\,n\,H^2O \\ +\,CO^3\,K^2 + 3\,CO^2 \end{matrix}\right.$$

Théoriquement, la proportion de silice devrait tomber de 66 °/₀. Or, les expériences de Berthier, relatées d'autre part, accusent une différence de 41 °/₀. Dès lors, il faut admettre : ou bien que le kaolin analysé était impur, et qu'il contenait encore de la silice amorphe, ce qui est assez naturel — ou bien que la réaction est nécessairement incomplète et limitée. Pour notre démonstration, ce fait importe peu, d'ailleurs, et nous adopterons volontiers la seconde hypothèse.

Ainsi, grâce à l'action de l'acide carbonique provenant de l'atmosphère ou de la décomposition des matières humiques du sol, des particules feldspathiques sont partiellement kaolinisées. Un *feldspath plagioclase* (contenant de la chaux et des alcalis) engendrerait quatre éléments dérivés : du *silicate d'alumine hydraté* (argile), de la *silice gélatineuse*, du *carbonate de chaux* et un *carbonate alcalin*. Ce dernier corps est entièrement soluble dans l'eau pure ; mais si l'acide carbonique se trouve en excès, une partie du calcaire entrera aussi en dissolution à l'état de *bicarbonate de chaux*.

Conséquences possibles. — Les composés insolubles résultant des actions désagrégeantes : l'argile, la silice et le calcaire, se trouvent dans le résidu associés aux débris rocheux inattaqués. Que deviennent alors les matières dissoutes, et notamment le carbonate de potasse ? Sont-elles entraînées intégralement par les eaux, ou le sol en absorbe-t-il une proportion appréciable ?

La transformation étant faite, supposons un milieu essentiellement minéral *(sol primitif)* ne contenant plus d'acide carbonique gazeux. Nous avons sous les yeux du feldspath non attaqué (élément originel), de l'argile pure, de la silice gélatineuse et du carbonate

de potasse. L'argile pure, ainsi que je le démontrerai bientôt, décompose une fraction du carbonate alcalin, avec dégagement de gaz carbonique, et absorbe un peu de potasse. La silice hydratée agit dans le même sens. Avec le premier corps, il se forme, par *voie régressive,* une sorte de silicate double d'alumine et de potasse (plus pauvre que le feldspath primitif) qui représente vraisemblablement *l'argile colloïdale ;* avec le second, il se fait sans doute un silicate potassique soluble — conformément aux réactions connues — très facilement décomposable par l'acide carbonique en excès ou précipitable à l'état de silicate calcique par les sels de chaux en dissolution... En ce cas, la potasse est rendue à la circulation... Dès lors, on peut admettre que cette réaction secondaire, contrebalancée par une action réciproque, ne saurait entrer en ligne de compte, et l'on voit qu'une fraction de l'alcali — celle qui n'est pas immobilisée par l'argile — sera inévitablement entraînée par les eaux.

Au contraire, si les matières humiques abondent *(sol végétal),* le carbonate de potasse réagit également sur elles en produisant un humate soluble que les composés calciques précipitent ensuite, mais qui conserve toujours — ainsi que je l'ai reconnu — une certaine quantité d'alcali. Et voilà comment l'argile et l'humus, en vertu de leur pouvoir absorbant, sont à différents titres des éléments de conservation. Il ne faudrait pas cependant exagérer l'importance de ces facultés conservatrices. Si les actions désagrégeantes n'étaient pas limitées par d'autres causes, si elles se manifestaient de façon intense, on perdrait inévitablement une assez forte proportion d'alcali.

L'expérience montre, en effet, que sur 16 °/₀ de potasse contenue dans le feldspath orthose, l'argile formée en absorbe le *sixième* au plus (2,5 °/₀). La

matière noire, toujours d'après nos essais, en entraînerait quelques centièmes. Étant donné que la plupart des sols ne contiennent que 1 à 2 °/₀ d'humates et d'humophosphates, la fraction d'alcali retenu par les composés humiques, eu égard à l'ensemble de la terre, n'est jamais bien importante. Il suit de là qu'une désagrégation très active aurait de déplorables effets. Mais la nature a bien fait les choses : *elle limite, dans nos terrains, les actions désagrégeantes.* Et voici comment l'agglomération peut atténuer la désagrégation.

Conservation des éléments originels. — L'étude micrographique et minéralogique des terres arables nous a conduit à distinguer les *composants originels* et les *composants dérivés.* Nous avons vu qu'il était même possible de séparer les espèces minérales contenues dans les sables décapés. Tous les terrains examinés renferment des fragments de *quartz*, de *mica*, de *feldspath*, etc.

Pourquoi, après de longs siècles, les sols contiennent-ils encore une proportion considérable d'éléments originels ? Comment se fait-il que ceux-ci, depuis l'époque très lointaine où ils prirent naissance, ont conservé leurs caractères primitifs ? Au premier abord, ces questions paraissent insolubles. De fait, si les actions désagrégeantes étaient intenses et continues, on s'expliquerait difficilement la résistance que peuvent lui opposer des débris silicatés d'une grande finesse. Pour en découvrir la cause, il suffit d'invoquer la notion de *structure.*

Les particules terreuses sont formées de débris sableux agglomérés par un ciment colloïdal à base d'argile ou d'humus : c'est le *revêtement*, l'*enduit* dont nous avons parlé. Non seulement l'enduit agglutine les éléments originels, mais il forme autour d'eux

une enveloppe protectrice. Dès que le conglomérat est formé, l'eau chargée de gaz carbonique n'a plus de prise sur les débris intérieurs ; elle exerce seulement une action de contact, une action superficielle sur le revêtement : *elle mobilise sans désagréger* Pour que la désagrégation agisse de nouveau efficacement sur les éléments silicatés originels, il faut que la *molécule terreuse* soit démolie par une cause d'ordre mécanique (travail du sol), d'ordre physique (gelée), d'ordre chimique ou biologique amenant la destruction des matières colloïdales de l'enduit. Or, dès que la décomposition recommence, les colloïdes entrent de nouveau en jeu, et il se reforme un autre agrégat terreux avec enduit protecteur.

On voit, en somme, que les agents de décomposition chimique, dans les conditions naturelles, ne peuvent intervenir que pendant un laps de temps très court, et l'on conçoit alors avec quelle excessive lenteur se modifient les éléments originels. Il y a plus ! Par les apports d'engrais : fumier et sels alcalins, nous donnons au sol des principes nécessaires à la production des colloïdes, des agglutinants, de telle sorte que les agglomérats terreux peuvent se reconstituer, du moins en partie, sans la mise en œuvre des éléments silicatés originels.

Toutes ces influences nettement retardatrices expliquent très bien la longue conservation des espèces minérales susceptibles de décomposition ou d'épigénisation, et il est curieux de constater que les actions désagrégeantes se limitent ainsi d'elles-mêmes.

III. — Actions dissolvantes.

On sait quedans les circonstances ordinaires, après avoir traversé le sol, l'eau renferme toujours des

matières étrangères : elle contient en dissolution, outre les gaz de l'air (oxygène, azote et acide carbonique), des substances minérales diverses (bicarbonate de chaux, plâtre, nitrates, chlorures, etc.) ainsi que des matières organiques (acide humique, humates, humophosphates, etc.). La présence de l'acide carbonique libre augmente les facultés dissolvantes de l'eau à l'égard de certains composés, et c'est pourquoi nous y trouvons aussi du calcaire et des phosphates. A cause du rôle important que l'eau exerce dans la chimie du sol, en tant que véhicule, nous étudierons plus spécialement la dissolution de l'acide carbonique, du calcaire, des phosphates et de la potasse.

Dissolution de l'acide carbonique et du calcaire. — Le gaz carbonique contenu dans l'atmosphère du sol (en bien plus forte proportion que dans l'air atmosphérique) se dissout peu à peu dans les couches d'eau qui imprègnent les particules terreuses. Il agit aussi sur les composés calciques (carbonate et phosphate de chaux), et c'est grâce à lui qu'il se forme du bicarbonate de chaux.

M. Th. Schlœsing a soigneusement étudié la dissolution du calcaire dans les eaux en présence d'une atmosphère plus ou moins riche en acide carbonique. L'expérience montre que si l'*acide carbonique et le carbonate neutre de chaux* (CO^3Ca) *se dissolvent comme s'ils étaient seuls, la proportion de bicarbonate de chaux* (CO^3Ca,CO^2) *dépend, pour une température donnée, de la tension de l'acide carbonique dans l'atmosphère gazeuse.* Soient x cette tension, y le poids de carbonate de chaux correspondant au bicarbonate, l'équation $x^m = ky$ exprime la loi générale suivant laquelle s'effectue la dissolution du calcaire sous l'influence de l'acide carbonique

Pour une température voisine de 16°, l'exposant m étant égal à 0,3787 et le coefficient k à 0,9218, l'équation peut s'écrire : $x^{0,3787} = 0,9218\, y$ (1).

Les nombres ci-dessous, empruntés à l'intéressant travail de M. Schlœsing, montrent la parfaite concordance des résultats obtenus par l'expérience et par le calcul :

Tension (x) de l'acide carbonique en atmosphères.	Poids (y) du calcaire en grammes, correspondant au bicarbonate de chaux, par litre.	
	Trouvé.	Calculé.
0,1422	0,5199	0,5186
0,2538	0,6503	0,6458
0,4167	0,7748	0,7792
0,5533	0,8724	0,8675
0,7297	0,9589	0,9633
0,9841	1,0729	1,0788

Dans les terrains agricoles, où l'atmosphère confinée renferme environ 1 °/₀ d'acide carbonique, les eaux contiennent approximativement 0gr,196 de carbonate de chaux dissous par litre. Il n'est pas sans intérêt de faire remarquer que ce nombre varie à chaque instant avec la tension, la température, etc... Si l'air du sol s'appauvrit en acide carbonique, si le volume d'eau diminue, une fraction du bicarbonate se décompose et du calcaire se précipite ; au contraire, quand la dose d'acide carbonique augmente, la tension croît, et une nouvelle quantité de carbonate de chaux entre en dissolution.

D'autre part, puisque tous les calcaires ne sont

(1) Nous ne croyons pas devoir insister ici sur cette importante question qui ne se rapporte que très indirectement à la chimie du sol ; nous l'examinerons en détail dans notre volume sur « *La pratique des fumures* ».

pas également attaquables, — comme l'ont montré MM. Houdaille et Semichon, — la richesse des eaux, à égalité de tension et de température, dépend de la *vitesse d'attaque spécifique* des roches calcaires. C'est le carbonate de chaux actif, le *calcaire précipité*, qui joue le plus grand rôle dans la chimie du sol.

Dissolution des phosphates. — A l'exception des phosphates alcalins et du phosphate monocalcique, les autres phosphates métalliques sont à peu près insolubles dans l'eau pure. En présence de l'acide carbonique et des carbonates alcalins, les conditions de solubilité changent sensiblement. Et tandis que le gaz carbonique favorise la dissolution des phosphates de chaux, les carbonates et les humates alcalins réagissent lentement sur les phosphates de sesquioxyde de fer et d'aluminium. Etant donné que les eaux du sol contiennent de semblables réactifs, on peut admettre qu'une fraction de l'acide phosphorique entre ainsi dans la circulation et contribue à la nutrition végétale.

Action de l'acide carbonique. — L'action de l'acide carbonique sur le phosphate de chaux a été étudiée par Dumas, Lassaigne, Bobierre et Dehérain. Si nous admettons que l'eau sert simplement de véhicule à l'acide carbonique, les équations suivantes traduisent le phénomène de solubilisation :

a) $P^2O^8Ca^3 + CO^2,H^2O = P^2O^8H^2Ca^2 + CO^3Ca$
b) $P^2O^8H^2Ca^2 + CO^2,H^2O = P^2O^8H^4Ca + CO^3Ca$

Le *phosphate tricalcique* ($P^2O^8Ca^3$ ou P^2O^5, $3CaO$), sous l'influence de l'eau chargée de gaz carbonique, passe à l'état de *phosphate bicalcique* ($P^2O^8H^2Ca^2$ ou $P^2O^5H^2O$, $2\ CaO$) qui se transforme ensuite en *phosphate monocalcique* ($P^2O^8H^4Ca$ ou P^2O^5, $2\ H^2O$, CaO).

A la rigueur, on pourrait faire intervenir deux molécules d'acide carbonique et former ainsi le *phosphate monocalcique* en parlant du *tricalcique :*

$$c)\ P^2O^8Ca^3 + 2\,(CO^2,H^2O) = P^2O^8H^4Ca + 2(CO^3\,Ca)$$

Dans l'un et l'autre cas, il se fait du carbonate de chaux (CO^3Ca ou CO^2CaO) comme produit secondaire.

De ces réactions, en apparence très simples, nous ne retiendrons que la dernière, nous admettrons que le *phosphate bicalcique* se produit par voie régressive ou rétrogradante. Et c'est ici que surgissent les difficultés... La réaction (c) est réversible : *le phosphate monocalcique, en présence du carbonate de chaux, passe à l'état de phosphate bicalcique ou tricalcique.* Si *l'action dissolvante* l'emporte sur l'action *rétrogradante,* le phosphate restera en dissolution ; mais si l'acide carbonique disparaît, la précipitation de l'acide phosphorique se produit aussitôt... En réalité, le travail de solubilisation ne serait qu'à moitié perdu s'il devait se former du *phosphate bicalcique,* plus facilement attaquable (1). Je reviendrai ultérieurement sur cette question. Retenons simplement ceci : *l'acide carbonique libre, en dissolution dans l'eau, commande et règle effectivement la solubilisation du phosphate de chaux.*

Expériences de M. Schlœsing. — M. Th. Schlœsing fils, qui a soigneusement étudié la dissolution du phosphate, n'a pas limité ses recherches à l'action dissolvante de l'eau pure ou chargée d'acide carbonique ; il a voulu déterminer l'influence du bicarbonate de chaux... ce qui

(1) M. Schlœsing a démontré expérimentalement que des solutions étendues d'acide phosphorique réagissent sur le bicarbonate de chaux en donnant surtout du phosphate tricalcique.

lui a permis d'établir que *l'acide carbonique libre n'ajoute rien à la proportion d'acide phosphorique dissous quand il est accompagné de la quantité de bicarbonate de chaux correspondant à sa tension.* Voici, du reste, les résultats obtenus avec du phosphate tricalcique mis en présence de l'eau pure ou de l'eau saturée d'acide carbonique seul ou associé à du bicarbonate.

DISSOLVANTS EMPLOYÉS	SUBSTANCES DOSÉES par litre (en milligr.)	
	Acide phosphorique	Chaux
Eau distillée bouillie	0,74	»
Eau distillée (1200 cc), eau saturée de CO^2 (50 cc)	6,90	»
Eau distillée (1000 cc), eau saturée de CO^2 (250 cc)	48,50	»
Eau saturée de CO^2 (1250 cc)	91,90	»
Eaux de source (0 gr. 013, carbon. de chaux;		
a) bicarbonate (239 mg.) et CO^2 libre (9 mg.)	0,38	100,0
b) — (339 mg.) — (49 mg.).	1,10	162,3
c) — (541 mg.) — (105 mg.)	0,80	218,8
d) — (684 mg.) — (206 mg.)	1,77	273,3
e) — (785 mg.) — (301 mg.)	1,30	312,7

Il pouvait être intéressant de connaître la fraction d'acide phosphorique soluble contenu dans un sol donné. Pour la déterminer, M. SCHLŒSING fils a imaginé une méthode relativement simple qui consiste à agiter lentement, pendant dix heures, à la vitesse de deux tours par minute, 320 grammes de terre supposée sèche placés dans un flacon contenant 1300 cc. d'eau distillée (1). Ce procédé donne des résultats semblables à ceux que l'on obtient par la *méthode de déplacement.* On trouve, en effet :

(1) C. R. de l'Académie, t. CXXVII.

	ACIDE PHOSPHORIQUE DOSÉ (1) PAR LITRE (en milligrammes)	
	par déplacement	par agitation
Terre de Galande	0,10	0,17
Terre de Neauphle.	0,83	0,89
Terre de Coupvray	1,04	1,17
Terre de Joinville.	1,02	1,05
Terre de la Foisserie. . . .	1,16	1,19
Terre de Boulogne.	3,08	3,01

En opérant sur des sols inégalement humides, on observe que *la fraction d'acide phosphorique soluble, pour une même terre, est indépendante du degré d'humidité*. Cette constance dans la richesse des eaux s'expliquerait, selon nous, par la faible solubilité des *composés phospho-humiques*, et notamment des *humophosphates*.

Dans d'autres recherches (2), M. Schlœsing s'est proposé de déterminer le stock d'acide phosphorique soluble contenu dans différentes terres qui subirent *vingt-trois* épuisements successifs. Après un certain nombre de décantations, il observa un abaissement très sensible du titre. Tandis que 300 grammes de terre de Boulogne accusaient 3 milligrammes d'acide phosphorique par litre d'eau, à la suite des trois ou quatre premiers traitements, on en trouvait moins d'un demi-milligramme à la vingtième décantation. Toutefois, la quantité totale d'acide phosphorique n'en était pas moins considérable, puisqu'on obtint respectivement :

	ACIDE PHOSPHORIQUE SOLUBLE	
	pour 300 gr. (en milligr.)	par hectare. (en kilogr.)
Terre de Boulogne	33	440
Terre de Joinville	16	210
Terre de Neauphle	10	130

(1) L'acide phosphorique a été dosé à l'état de phosphomolybdate d'ammoniaque.

(2) C. R. de l'Académie, t. CXXXII, p. 1189.

« Il y a donc parfois, dans le sol, un stock d'acide phosphorique soluble dans l'eau, pouvant suffire à de nombreuses cultures, et qui se trouve entretenu par les engrais, les résidus de récolte et la décomposition des roches. » Étant donné que les plantes peuvent s'alimenter dans les solutions très étendues dont le titre se renouvelle plusieurs fois durant la période végétative, les exigences des cultures en phosphore seront satisfaites naturellement dans tous les terrains riches en matière noire et suffisamment actifs.

Action des humates alcalins. — L'acide carbonique et les acides faibles ne réagissent pas avec la même intensité sur tous les phosphates contenus dans le sol. S'ils attaquent assez facilement le phosphate de chaux, ils n'exercent qu'une action très imparfaite sur les *phosphates de sesquioxyde* de fer et d'aluminium qui sont solubles dans les alcalis et les carbonates alcalins. Étant donné que ces corps peuvent réagir sur l'humus, il convient d'examiner dans quelle mesure les humates dissolvent les *phosphates rétrogradés*.

A part les expériences de Dehérain, sur l'action des carbonates alcalins, il n'a été donné aucune preuve directe de la solubilité des phosphates de sesquioxyde dans les liquides du sol. Du fait que ces composés se trouvent toujours dans les humates extraits de la terre, par traitement aux alcalis, est-on autorisé à dire que la matière carbonique les dissout avec la même intensité sous toutes ses formes ? Rien ne le prouve, puisque les substances alcalines utilisées pour l'extraction de la *matière noire* peuvent intervenir directement.

Pour savoir à quoi s'en tenir, il fallait étudier la marche de la dissolution de l'acide phosphorique rétrogradé dans des solutions d'humate exactement neutralisées et bouillies. Dans ces conditions, si l'analyse

accuse des quantités appréciables d'acide phosphorique, on pourra dire que les phosphates de sesquioxyde de fer ou d'aluminium se dissolvent dans les matières humiques combinées aux alcalis ou dissoutes par eux.

Les expériences que j'ai effectuées ne laissent pas le moindre doute à cet égard. J'ai opéré sur 500 cc. d'humate ; les dosages ont été exécutés sur une première série après 8 jours et sur la seconde après 15 jours (1). Les résultats, rapportés à un litre, sont inscrits dans le tableau suivant :

		Acide phosphorique soluble (en gr.) APRÈS 8 jours	15 jours
A. Solution pure d'humate	Phosphate d'alumine (2 gr.)	0,098	0,123
	Phosphate de fer (2 gr.) . .	0,121	0,186
	Scories (4 gr.)	0,071	0,083
B. Solution étendue de moitié d'eau	Phosphate d'alumine (2 gr.)	0,025	0,032
	Phosphate de fer (2 gr.). .	0,067	0,087
	Scories.	0,016	0,020

On remarquera tout de suite que la quantité d'acide phosphorique dissous augmente avec la concentration des solutions; elle croît aussi, dans une certaine mesure avec le temps de contact, c'est-à-dire avec la durée de l'expérience.

En réalité, la proportion de phosphate solubilisé n'est pas très considérable; mais i vonecnt de remarquer que, dans mes recherches, la solution d'humate renfermait par litre :

Matière sèche.	21 gr. 3
Cendres.	9 gr. 7
Matière organique (par différence)	11 gr. 8

(1) Les solutions d'humate de potassium ont été neutralisées, dans tous mes essais, par l'acide acétique; je me servais même d'une solution légèrement acide pour les phosphates de sesquioxyde qui sont insolubles dans les acides faibles.

Je me trouvais donc en présence d'un liquide contenant déjà une quantité notable de matières minérales. Dès lors, on conçoit que sa puissance dissolvante soit sensiblement affaiblie.

J'ai pensé qu'il y aurait intérêt à rechercher si la richesse minérale des humates influe sur leur pouvoir dissolvant. Pour cela, j'ai employé deux solutions obtenues en traitant des terres différentes par une même dose de carbonate de potassium. Le rapport de la matière organique aux cendres était égal à 1,3 pour le liquide C et à 2 pour la solution D.

En opérant comme il a été dit précédemment, sur 500 cc. de liquide, on a trouvé après 15 jours :

		Acide phosphorique dissous
Solution C (Rapport 1,3)	Phosphate d'alumine (2 gr.) .	0,097
	Phosphate de fer (2 gr.) . .	0,130
Solution D (Rapport 2)	Phosphate d'alumine (2 gr.) .	0,145
	Phosphate de fer (2 gr.) . .	0,303

Les différences sont assez sensibles : 0,048 pour le phosphate d'alumine et 0,073 pour le phosphate de fer. Il est curieux de remarquer que la solubilité du phosphate de fer est supérieure à celle du phosphate d'alumine. De plus, comme il fallait le prévoir, *la proportion d'acide phosphorique solubilisé varie avec la grandeur du rapport des matières organiques aux cendres.*

Je n'insisterai pas sur la solubilité de l'acide phosphorique des scories. Dans ces premières recherches, je me suis attaché surtout à étudier la puissance dissolvante des humates alcalins sur les phosphates insolubles dans l'acide acétique. Comme le dit Dehérain, on peut atténuer sensiblement la *rétrogradation* par l'apport du fumier. Et l'on comprend ainsi pourquoi, dans les terres régulièrement fumées, si ce phénomène se produit, il ne saurait avoir les mêmes conséquences que dans les sols appauvris par une mauvaise culture.

La présence de la matière organique assure donc l'assi-

milisation des phosphates insolubles, tant par l'action directe ou indirecte de l'acide carbonique résultant de sa combustion, que par celle des humates alcalins. Au reste, ces deux actions concourent au même but ; elles pourront agir simultanément ou consécutivement suivant que le carbonate alcalin, formé dans la dégradation des roches potassiques ou par double décomposition (action des sels sodiques et des engrais de potasse sur les calcaires du sol), réagira sur les phosphates mêmes ou sur l'humus (1).

Action des acides organiques. — Dans les sols riches en matières organiques, il se produit parfois de l'*acide acétique* en proportion appréciable. D'après M. G. Paturel, certaines terres des landes bretonnes en contiendrait 0,19 pour 1,000. L'action dissolvante de ce corps s'exerce surtout à l'égard du phosphate calcique ; mais comme la production de l'acide acétique est plutôt exceptionnelle, il ne faut pas en exagérer le rôle. Les *acides humiques* réagissent également sur les phosphates, soit directement, soit indirectement, par les produits résultant de leur décomposition.

Dissolution de la potasse. — Les eaux de drainage ne contiennent ordinairement qu'une faible proportion de potasse; mais si l'on emploie un excès d'eau, une quantité notable d'alcali entre en dissolution.

---

(1) Une conséquence assez inattendue se dégage de ces expériences. Le nitrate de soude et les sels potassiques, qui se transforment en carbonates alcalins, peuvent favoriser l'assimilation des phosphates, directement ou indirectement, en produisant des humates. On s'expliquerait ainsi pourquoi le blé se trouve bien en général des doubles fumures azotées et phosphatées. Cette question mérite d'être approfondie ; elle nous montre l'importance du rôle indirect des matières fertilisantes et de leur action réciproque.

Ainsi, en épuisant successivement 100 grammes d'une même terre par un litre d'eau pure, M. BERTHELOT et ANDRÉ oni obtenu :

	POTASSE DISSOUTE (en milligrammes)
Premier lavage.	6,7
Deuxième lavage	4,9
Troisième lavage	3,7
TOTAL	14,3

Ce qui correspondrait seulement à 572 kilog. par hectare. Quand on ajoute à l'eau différents produits neutres : *sucre*, *acétamide*, etc..., la dissolution de la potasse est encore plus accentuée.

P. P. DEHÉRAIN a trouvé de semblables résultats.

Quand on emploie des quantités croissantes d'eau, la dose de potasse augmente sensiblement. Avec 5 et 20 parties d'eau pour une partie de terre, on obtient respectivement :

	POTASSE ENLEVÉE AU SOL	
	par kilog.	par hectare
	gram.	kilos
Par 5 parties d'eau :		
Terre fertile	0,019	76
Terre épuisée	0,009	36
Par 20 parties d'eau :		
Terre fertile	0,200	400
Terre épuisée	0,053	212

Ces divers essais concordent parfaitement. *Ils montrent que l'eau dissout*, dans tous les cas, une *proportion appréciable de potasse, toujours en rapport avec le volume de liquide employé à l'épuisement.* La composition de l'eau (teneur en matières organiques,

en acide carbonique et en sels minéraux) ainsi que la nature du sol influent donc sensiblement sur la richesse potassique des liquides du sol.

Pour se faire une idée exacte de la fraction de potasse existant à l'état soluble dans les eaux qui imprègnent les particules terreuses, il faut employer la *méthode de déplacement* ou la *méthode d'agitation* qui a permis à M. Schlœsing fils de faire des recherches semblables à celles que nous avons mentionnées pour l'acide phosphorique.

Dissolution des composants. — Les composants originels et dérivés sont-ils partiellement solubles dans l'eau ? S'il faut en croire les récents travaux de MM. Delage et Lagatu, sur la constitution des terres arables, les espèces minérales — les feldspaths et les micas — se dissoudraient très faiblement dans les liquides du sol. Cette opinion serait confirmée par les recherches des frères Rogers qui ont obtenu — avec des minéraux pulvérisés au mortier d'agate et mis en digestion dans l'eau pendant deux jours — des solutions titrant 0,4 à 1 °/₀₀ des matières salines (1). Les essais que nous avons effectués, en opérant les dissolutions dans des flacons de gutta, permettant d'affirmer que si certains minéraux, tels que l'apatite et la calcite, se dissolvent réellement dans l'eau, sans que leur composition chimique change, il en est d'autres, au contraire (éléments feldspathiques et ferro magnésiens) qui abandonnent un résidu dont la composition chimique diffère sensiblement de celle des espèces traitées.

Parmi les composants dérivés, c'est la matière noire qui se dissout le mieux, quoique faiblement.

---

(1) *Les constituants minéraux des solutions des sols !* par MM. Cameron et Bell (traduction H. Fabre).

On trouve toujours, dans les eaux du sol, des humates et des humophosphates qui apportent de l'azote, de la chaux, de la potasse et de l'acide phosphorique. Ainsi que je le montrerai dans un autre ouvrage (1), les sols des anciens jardins maraîchers abandonnent parfois à l'eau bouillante, en raison de leur richesse en matière noire, une proportion de principes fertilisants supérieure à celle que les acides violents peuvent enlever à des terrains moyennement pauvres.

IV. — Actions rétrogradantes.

Les matériaux dissous par l'eau, ainsi que les divers engrais solubles incorporés au sol, ne persistent pas indéfiniment sous leur forme primitive ; ils subissent des transformations régressives, partielles ou totales, qui ont pour effet de les immobiliser temporairement. C'est à ce titre que le *pouvoir absorbant*, dont les effets se manifestent à l'égard de l'acide phosphorique et des alcalis, peut se rattacher aux *actions rétrogradantes*.... Il y a plus ! Si nous posons en principe que toute substance rétrograde quand elle passe de l'état soluble à l'état insoluble, nous devons admettre que les *actions rétrogradantes* comportent :

1° *des rétrogradations par absorption simple* ;
2° *des rétrogradations par précipitation simple* ;
3° *des rétrogradations par absorption et précipitation simultanées*.

Certains composés, comme les phosphates solubles, présentent ce double caractère : ils sont absor-

(1) *La fertilisation du sol*, même Encyclopédie.

bés et précipités en partie, suivant la nature des corps sur lesquels ils réagissent. D'autres substances, au contraire, sont simplement absorbées ou absorbées puis réduites (sels ammoniacaux).

Rétrogradation par absorption. — Il conviendrait de revenir ici sur les *propriétés absorbantes* du sol ; comme elles ont déjà fait l'objet d'une étude approfondie, je ne mentionnerai que le cas particulier de rétrogradation de l'azote ammoniacal, par absorption et réduction.

C'est en étudiant l'absorption de l'ammoniaque par des sols calcaro-humifères que j'ai constaté sa rétrogradation. J'ai observé, en effet, que le sulfate d'ammoniaque incorporé à des terres tourbeuses pouvait donner naissance, dans certains cas, à des composés organiques azotés. Je suppose qu'il se forme d'abord un humate d'ammoniaque qui rétrograde ensuite par voie chimique ou par voie microbienne : l'humate ammoniacal, par déshydratation, se changerait en composé amidé. Quel que soit le processus suivi, le fait en lui-même paraît indiscutable. J'ai étendu depuis mes recherches à des terres de nature différente et j'ai toujours obtenu des résultats conformes. Au début, on a dosé, dans chaque sol mis en expérience, la proportion d'azote total et d'azote déplaçable par la magnésie :

	Pour 1000 de terre normale		
	Azote total	Azote déplaçable	Azote organique
Terre de Grignon . . .	1,64	0,012	1,628
Terre de la Creuse . . .	2,52	0,023	2,497
Terre tourbeuse (Gironde).	20,75	0,173	20,537

Les sols reçurent ensuite des sels ammoniacaux dissous : chlorure, sulfate et nitrate. On étudia la marche de l'absorption de l'ammoniaque dans les échantillons. Après plusieurs mois, les terres furent bien lavées, et lorsque le liquide d'égouttage ne donnait plus de réaction avec le réactif de Nesler, on dosa de nouveau l'azote total et la fraction d'azote déplaçable.

Les nombres obtenus diffèrent sensiblement :

	POUR 100 DE TERRE TRAITÉE (1)			
	Azote total	Azote déplaçable	Azote organique	Azote rétrogradé
a) Au sulfate d'ammoniaque.				
Terre de Grignon.	2,882	0,931	1,951	0,323
Terre de la Creuse.	3,187	0,344	2,843	0,346
Terre tourbeuse .	23,200	1,070	22,130	1,593
b) Au chlorydhate d'ammon.				
Terre de Grignon.	2,710	0,830	1,880	0,252
Terre de la Creuse.	2,688	0,170	2,518	0,021
Terre tourbeuse .	21,700	0,760	20,940	0,403
c) Au nitrate d'ammoniaque.				
Terre de Grlgnon.	2,739	0,816	1,923	0,295
Terre de la Creuse.	2,777	0,221	2,556	0,059
Terre tourbeuse .	21,300	0,960	21,340	0,803

Ainsi, dans tous les cas, la quantité d'azote non déplaçable par la magnésie se trouve en augmentation pour les terres traitées. La rétrogradation de l'ammoniaque me paraît d'autant moins contestable que les nombres trouvés par l'emploi de la magnésie sont un peu inférieurs à ceux que l'on obtient en attaquant

(1) L'*azote rétrogradé* a été calculé en retranchant de l'*azote organique* des terres traitées le nombre correspondant pour les sols non traités. On suppose que l'*azote déplaçable* par la magnésie correspond à de l'azote ammoniacal, ce qui n'est pas toujours vrai.

la terre par le carbonate de soude, dans le vide, à 50 ou 60 degrés, ainsi que le conseille M. Müntz.

A quelles causes faut-il attribuer cette transformation? Les ferments interviennent-ils comme dans le tas de fumier? Pour le savoir, j'ai répété l'expérience en milieu stérilisé. Nous avons trouvé, avec le sulfate d'ammoniaque, après un mois :

	POUR 1000 DE TERRE STÉRILISÉE			
	Azote total	Azote déplaçable	Azote organique	Azote rétrogradé
Terre de Grignon .	3,084	0,832	2,200	0,572
Terre de la Creuse.	2,867	0,250	2,617	0,120
Terre tourbeuse .	22,310	1,080	21,230	0,693

Les proportions d'azote déplaçable par la magnésie ne sont pas très différentes de celles obtenues pour les terres non stérilisées. Mais les sols accusent encore une augmentation sensible d'azote organique : avec la terre de Grignon, l'accroissement correspond à 0,572 par kilogramme.

En somme, on voit que les matières humiques naturelles absorbent l'ammoniaque, en donnant vraisemblablement des humates, et qu'il se produit en outre, quand la nitrification est paralysée, des composés azotés d'une nature spéciale au détriment de l'azote ammoniacal qui subit alors une véritable rétrogradation. Comme ce phénomène se manifeste même dans les sols stérilisés, il peut donc être d'origine purement chimique.

Rétrogradation par précipitation. — En bien des cas, les sels solubles contenus dans les eaux du sol sont simplement précipités conformément aux lois générales de la chimie. C'est ainsi que les humates et les

silicates alcalins se transforment en composés terreux. Les sels calciques, alumineux et ferriques provoquent ces transformations. Nous en produisons de semblables, au laboratoire, en traitant le *silicate de potasse* (SiO^3K^2) par le *chlorure de calcium* ($CaCl^2$) : il se fait alors, par double décomposition, un *silicate de chaux* (SiO^3Ca) et du *chlorure de potassium* (KCl) :

$$SiO^3K^2 + CaCl^2 = SiO^3Ca + 2\,(KCl)$$

Précipitation des phosphates solubles. — De même, le *phosphate monocalcique* ($P^2O^8H^4Ca$) réagit sur le calcaire ou *carbonate de chaux* (CO^3Ca) et donne du *phosphate bicalcique* ($P^2O^8H^2Ca^2$) ou du *phosphate tricalcique* ($P^2O^8Ca^3$) avec mise en liberté d'acine carbonique (CO^2) :

a) $P^2O^8H^4Ca + CO^3Ca = P^2O^8H^2Ca + CO^2 + H^2O$
b) $P^2O^8H^4Ca + 2\,(CO^3Ca) = P^2O^8Ca^3 + 2\,(CO^2) + 2\,(H^2O)$

Quand la chaux est combinée aux acides forts (acides chlorhydrique et azotique), elle n'agit pas sur le phosphate monocalcique.

Les réactions précédentes, qui touchent à la rétrogradation de l'acide phosphorique, présentent un puissant intérêt. Se forme-t-il, dans le sol, du phosphate bicalcique ou du phosphate tricalcique ? Les expériences de M. Schlœsing (1) confirment la dernière supposition. « Si l'on introduit, en effet, une petite quantité d'une liqueur titrée d'acide phosphorique dans une solution limpide de bicarbonate de chaux — et qu'on y fasse passer ensuite un courant d'air purifié — l'acide carbonique libre est éliminé peu à peu, et des proportions correspondantes de

(1) C. R. de l'Académie, t. CXXXI, p. 211.

bicarbonate sont décomposées ; il devrait se produire, d'abord, un précipité de carbonate de chaux, mais c'est du phosphate tricalcique qui se forme, et l'on peut même, en ajoutant de l'acide phosphorique en temps voulu, séparer toute la chaux à l'état de phosphate. Après douze heures, la précipitation est très avancée ; elle se ralentit plus tard, et il reste en solution une quantité d'acide phosphorique de même ordre que celle existant dans les eaux du sol. »

Les sels alumineux et ferriques, quand ils sont dissous, précipitent aussi les phosphates solubles en formant des phosphates de sesquioxyde.

On peut montrer cette réaction en traitant du sulfate d'alumine ou du chlorure ferrique par du phosphate de potasse ou de soude ; il se fait un précipité gélatineux, insoluble dans l'acide acétique, mais attaquable par les alcalis et les carbonates alcalins. A. Millot, qui étudia soigneusement la rétrogradation des superphosphates, en a donné de très jolis exemples.

Ainsi, la précipitation de l'acide phosphorique, en présence du calcaire et des composés alumineux et ferriques, aboutit inévitablement à la production de phosphates insolubles. Si d'autres causes n'intervenaient pas, les cultivateurs devraient renoncer à l'emploi des superphosphates. Nos terrains contiennent fort heureusement d'autres composés (matières humiques) qui s'opposent à cette rétrogradation et en atténuent les fâcheuses conséquences.

Précipitation des humates solubles. — En se dissolvant dans les alcalis ou dans les carbonates alcalins, les matières humiques naturelles engendrent des composés mal définis qne nous désignons sous le nom d'*humates*. Le carbonate de potasse, provenant des actions désagrégeantes et mobilisantes, pro-

15*

duit ainsi un *humate potassique* soluble qui colore l'eau en brun ou en noir. Ce corps, qui prend naissance dans le sol par action directe, ne persiste pas longtemps sous la forme primitive : les sels de chaux, d'alumine et de fer le précipitent aussitôt à l'état d'humate insoluble. Étant donné que les eaux du sol contiennent surtout des composés calciques, on peut admettre qu'il se fait principalement de l'humate et de l'humophosphate de chaux.

En l'absence des phosphates dissous, il se produit exclusivement des humates terreux. Dans le cas contraire, l'acide phosphorique est entraîné ou précipité, et l'on obtient alors des composés phospho-humiques ou des mélanges d'humates et d'humophosphates. Pour bien comprendre le processus de formation de ces corps, nous examinerons d'abord les cas de précipitation simple.

1° Formation des humates terreux. — Une solution étendue d'humate potassique, traitée par du nitrate ou du chlorure de calcium, donne un précipité brun d'humate calcique très faiblement soluble dans l'eau. Si l'on emploie le bicarbonate et le sulfate de chaux, on obtient une réaction semblable, mais la précipitation s'effectue plus lentement (1).

Les précipités recueillis sur un filtre sont abondamment lavés, pour éliminer l'excès de réactif, puis séchés dans le vide ou à faible température. Dans ces conditions, à cause de leur hygroscopicité, ils conservent encore 12 à 15 o/o d'eau. A l'état sec, la matière est noire, brillante, à cassure conchoïdale ; elle ne présente pas toujours une composition fixe,

---

(1) Les sels solubles d'alumine et de fer — la plupart des nitrates, des sulfates et des chlorures métalliques — donnent également des humates correspondant, parfois mélangés d'acide humique si le réactif précipitant présente lui-même une réaction acide.

comme en témoignent les résultats analytiques, mais l'examen microscopique n'y décèle aucune trace apparente des matières végétales originelles (1).

Le processus de formation des humates de magnésium, d'aluminium et de fer, est de tous points semblable au précédent, mais il ne nous intéresse pas au même degré.

2° Formation des humophosphates. — En étudiant la composition de la matière noire extraite de différents sols ayant reçu de fortes fumures phosphatées et potassiques, je fus frappé de sa grande richesse en acide phosphorique. Pourquoi l'humus, qui absorbe d'ordinaire 2 o/o de cet élément, quand on l'immerge dans une solution de phosphate monocalcique, en accuse-t-il trois à quatre fois plus dans la matière noire ? Ne pouvant invoquer exclusivement le mécanisme de l'absorption directe, j'eus l'idée de traiter l'humate de potasse par du phosphate monocalcique. Cet essai me révéla un fait inattendu... Le phosphate acide de chaux précipite bien l'humate alcalin, mais il se forme un composé d'une nature spéciale où l'on retrouve les principes fertilisants en telles proportions qu'il faut écarter l'hypothèse d'un simple entraînement.

Ainsi, en faisant réagir 100 cc. d'une solution contenant 3,45 o/o de phosphate monocalcique (dosant 2,099 d'anhydride phosphorique) sur un volume connu (250 cc.) d'humate de potasse, préparé en traitant une terre tourbeuse par une solution alcaline, j'ai produit un composé dosant à l'état sec :

(1) L'humate calcique dose 10 à 12 o/o de chaux environ, et une petite quantité de potasse qui résiste aux lavages prolongés. Traité par des sels de potasse ou de soude (*sulfate*, *silicate*, *carbonate*, *etc.*) susceptibles de former des composés calciques insolubles, il peut se retransformer en humate alcalin.

	POUR CENT
Matières combustibles.	60,800
Azote organique.	2,814
Acide phosphorique	7,520
Chaux (en CaO)	19,784
Potasse (en K^2O)	1,753
Fer (dosé au caméléon)	2,280

Malgré la forte proportion de chaux (représentant ici près de la moitié des cendres), il me paraissait bien difficile d'admettre que l'acide phosphorique fût entraîné accidentellement ou par les affinités absorbantes. N'avions-nous pas produit un composé chimique nouveau, un *humophosphate?* Cette première expérience ne permettait pas de l'établir péremptoirement. Sans doute, la précipitation de l'humate par le phosphate monocalcique détermine toujours l'entraînement d'une fraction de l'acide phosphorique et donne ainsi naissance à des corps riches en phosphore, mais rien ne nous autorise à dire qu'il se produit alors incontestablement des *humophosphates.*

Il est bien manifeste que les sels métalliques incorporés à une solution d'humate et de phosphate alcalins peuvent former un mélange d'humate et de phosphate insolubles. Le sulfate d'alumine, par exemple, qui précipite l'humate de potasse, précipite également le phosphate alcalin... Du moment que ces corps sont associés ensemble, il n'y a aucune raison pour que la réaction change de sens, et il ne convient pas d'appliquer le nom d'*humophosphate* au mélange d'humate et de phosphate d'alumine ainsi obtenu.

Avec le *phosphate monocalcique,* la réaction n'est pas du tout comparable. Ce composé ne réagit pas, en effet, sur le *chlorure* et le *nitrate de calcium* dont la présence ne saurait provoquer l'insolubilisation de l'acide phos-

phorique. Pour que le phosphate monocalcique passe à l'état *bicalcique*, il faut le concours de la chaux libre ou carbonatée. En l'absence de ces matières, il n'y a donc pas lieu de redouter la formation du *phosphate précipité* ($P^2O^8H^2Ca^2$).

Dès lors, on obtiendra l'*humophosphate calcique* — celui que nous avons plus spécialement étudié — en traitant un humate alcalin (*humate de potassium*) par du *phosphate acide de chaux*. Voilà le principe de la réaction... Il est très discutable à première vue. — Se forme-t-il vraiment des substances nouvelles, des humophosphates ? Etant donné que nous connaissons imparfaitement les matières humiques naturelles, la question mérite d'être examinée avec beaucoup de soin. — Les nombreuses recherches effectuées à mon laboratoire vont me permettre de bien préciser les conditions expérimentales.

La préparation de l'*humophosphate* exige la mise en œuvre de deux solutions : une solution de *phosphate monocalcique* et une solution d'*humate alcalin* exempte de carbonate. Si cette condition n'était pas satisfaite, on obtiendrait inévitablement un produit impur mélangé de phosphate précipité ; le carbonate alcalin, en réagissant sur le sel calcique, provoque la formation du carbonate de chaux qul détermine la rétrogradation du phosphate monocalcique. Il suffit de procéder à l'examen microchimique du précipité ainsi obtenu pour déceler son degré d'impureté : on constate alors, au milieu des flocons brunâtres du composé humique, l'existence de particules blanches ou de petits cristaux caractéristiques.

Pour se mettre à l'abri de ces réactious secondaires, il suffit de préparer l'humate avec des solutions étendues de carbonates alcalins, ou de le rendre très légèrement acétique... Cet acide décompose d'abord le carbonate en excès et précipite ensuite l'humus à des doses élevées : d'où résulte la possibilité d'obtenir, en agissant avec précaution, des liquides humiques neutres ou très légèrement acidulés. Après ébullition, on peut filtrer les solutions et les employer à la préparation de l'humophosphate.

Dans mes premiers essais de précipitation par le phos-

phate monocalcique, j'ai opéré sur 50 cc. d'une solution d'humate potassique (1) normale ou acidifiée, j'ai trouvé :

	SOLUTION NORMALE	SOLUTION ACÉTIQUE
Acide phosphorique introduit. . .	2,060	2,060
Acide phosphorique absorbé . . .	1,183	0,900
Rapport de l'absorption o/o. . . .	57,420	43,680

Suivant la nature des sols humifères ou tourbeux utilisés pour la production des humates, suivant les conditions expérimentales, l'action du phosphate monocalcique sera plus ou moins rapide. Ce corps, en raison de son acidité, peut provoquer au début la formation d'un léger précipité d'acide humique ; pour obtenir une bonne réaction, il convient de chauffer modérément au bain-marie ou d'attendre une douzaine d'heures. En opérant ainsi, la précipitation se produit très bien, et l'on peut recueillir des composés dosant encore, après filtration et lavage, 8 à 10 °/₀ d'acide phosphorique.

Pour bien mettre en évidence la production des humophosphates, il était nécessaire de procéder à des essais rigoureux et systématiques. Nous avons préparé une solution type d'humate potassique qui fut acidifiée par l'acide acétique à raison de 2 gr. 5 °/₀₀. Cette liqueur dosait par litre :

Extrait total.	17,79
Matières organiques. . . .	13,24
Matières minérales	4,52

L'analyse des cendres nous a donné :

(1) Cette solution dosait 4 gr. 61 o/o de matières humique.

	PAR LITRE DE SOLUTION
Acide phosphorique (en P^2O^5). .	0,041
Chaux (en CaO)	0,140
Alumine (Al^2O^3)	0,006
Sesquioxyde de fer	0,139

Une partie de la solution servit à la préparation de l'humate de chaux (traitement au chlorure de calcium) ; un autre prélèvement (500 cc.) fut additionné d'un excès de phosphate monocalcique et resta deux jours à une douce température. Dans le précipité d'humophosphate, recueilli sur un filtre et lavé avec un litre d'eau froide, on dosa ensuite l'acide phosphorique et la chaux :

	100 DE MATIÈRE SÈCHE CONTENAIENT :
Acide phosphorique. . . .	9,98
Chaux (en CaO)	12,81

L'humate calcique, préparé d'autre part, renfermait 9,34 °/₀ de chaux, En rapprochant ce nombre de celui qui correspond à l'humophosphate, on trouve une différence de 3,54. — Si tout l'acide phosphorique avait été précipité à l'état bicalcique, la proportion équivalente de chaux serait sensiblement égale à 7,87. Nous sommes déjà bien loin de compte ! Les quantités d'alumine et de fer contenues dans le liquide primitif sont trop faibles pour qu'on puisse admettre l'existence de *phosphates de sesquioxyde*.

Ainsi, la formation des *humophosphates* n'est pas douteuse. S'il s'était produit, en effet, un mélange d'*humate calcique* et de *phosphate précipité*, nous devrions trouver à l'analyse :

Chaux nécessaire à la production de l'humate. .	9,34
Chaux du phosphate précipité (pour 9,98 de P^2O^5).	7,87
TOTAL	17,21

Or, nous ne retrouvons que 12,88 °/₀ de chaux ; il en manque 4,33 °/₀. Nous ne pouvons pas davantage admettre que le phosphate existe à l'état soluble (phosphate monocalcique) puisque les lavages à l'eau ne l'entraînent pas.

Dans une autre série d'expériences, nous avons étudié les caractères principaux des humophosphates. Desséchés dans le vide, ces corps sont d'un beau noir à reflets de jais ; étendus sur une feuille de papier ils s'effritent lentement — peut-être en vertu de leur pouvoir hygroscopique — et les particules sont projetées avec force. Leur solubilité dans l'eau paraît très faible, ils sont généralement moins solubles que les humates. Celui que nous avons faite avec les solutions calciques, suivant la méthode précédemment indiquée, possède un *coefficient de solubilité* variant de 0,0001 à 0,00015.

A titre documentaire, voici les proportions de matières dissoutes par un litre d'eau distillée bouillie :

	MILLIGR.
Acide phosphorique	5,63
Chaux (CaO)	19,60
Potasse (en K^2O)	2,94

Ces résultats sont intéressants à plus d'un titre. Tout d'abord, il convient de remarquer que la quantité d'acide phosphorique soluble à l'eau ne diffère pas sensiblement des nombres trouvés par M. Th. SCHLŒSING fils dans les liquides extraits des sols fertiles par la méthode de déplacement. Il en est de même pour la potasse et la chaux. De telles constatations ne sont pas sans importance pour l'interprétation de la fertilité et des propriétés chimiques des terres arables. J'en donnerai bientôt la preuve.

Si les composés humiques accusent une faible solubilité dans l'eau pure, ce qui constitue un avantage sérieux, ils se dissolvent plus facilement dans les liquides alcalins. Les carbonates de potasse et de soude, les citrates et les oxalates solubles attaquent les humates et les humophosphates en donnant des solutions colorées : ce sont les dissolvants naturels de la matière noire, et nous les employons avantageusement pour déterminer la *richesse utilisable* du sol.

Dans d'autres essais, les quantités d'acide phosphorique dissoutes, à froid, s'élevaient respectivement, après 24 heures :

Pour le citrate d'ammoniaque à . . .	3,20 °/₀
Pour le carbonate de potasse à. . . .	3,70 °/₀

Dans les mêmes conditions, l'*acide acétique* pur, après un contact de 24 heures, en avait entraîné 0,0264 pour 100 de matière sèche. Avec l'eau bouillante, on a obtenu 0 gr. 0258 d'acide phosphorique par litre. L'acide chlorhydrique agit avec plus d'énergie ; à froid, l'humophosphate lui abandonne 5,32 °/₀ d'acide phosphorique, soit plus de la moitié de la quantité initiale. Le carbonate de potasse, à chaud, dissout presque entièrement l'acide phosphorique.

La faible solubilité de ces corps dans l'acide acétique montre bien que nous sommes en présence de composés particuliers. Cet acide attaque énergiquement les phosphates précipités ; il arrache même de l'acide phosphorique aux phosphates naturels (8 à 10 °/₀ de l'acide total), et on est en droit d'affirmer que si l'humophosphate contenait en mélange de semblables composés, l'action dissolvante de l'acide acétique serait autrement sensible que celle de l'eau pure.

Les composés phospho-humiques et les humophosphates se produisent-ils également dans le sol ? Considérons une particule terreuse isolée... Nous savons qu'elle est formée surtout d'éléments sableux

agglomérés par un ciment argileux ou argilo-humique, et qu'elle est entourée d'une enveloppe d'eau, puis d'une enveloppe d'air. La couche aqueuse, dont l'épaisseur varie avec le degré d'humidité, est suffisamment riche en acide carbonique pour assurer la mobilisation de la potasse et la dissolution des phosphates. Nous voilà donc en présence d'un phosphate de chaux soluble ; il ne manque plus que l'humate alcalin pour opérer la réaction. Or, la formation de ce composé est inévitable, car la potasse libérée vient attaquer les matières humiques. Dès lors, les corps réagissants se trouvent en présence, et il n'y a aucune raison pour qu'il ne se fasse pas de l'humophosphate.

Objectera-t-on que les solutions très étendues qui circulent dans le sol peuvent ne point réagir ? J'ai prévu cette objection, et je vais y répondre. Des expériences directes m'ont appris que la précipitation des humates alcalins exige des liquides phosphatés plus riches que ceux de la terre : il faut, en effet, un excès de phosphate. Si une molécule de phosphate monocalcique précipitait exactement une molécule d'humate, l'analyse de l'humophosphate devrait accuser des proportions d'acide phosphorique et de chaux en rapport avec celles contenues dans le réactif précipitant. Cela n'est pas : le phosphate monocalcique dose 142 d'anhydride phosphorique et 56 de chaux, tandis que l'humophosphate produit accuse *deux fois plus de chaux que d'acide phosphorique.* J'ai admis, tout d'abord, qu'il y avait double décomposition et qu'il se formait en même temps du phosphate de potasse. Dans la pratique, les choses ne sont pas aussi simples : la production partielle de l'humophosphate, en tant que substance insoluble, ne devient possible que si la quantité de chaux apportée par le réactif est suffisante pour précipiter intégralement la matière organique.

Cette constatation me suggéra une nouvelle idée. Ne peut-on pas entraîner la totalité du phosphate — que je suppose en solution très étendue — par l'emploi de liquides calciques mélangés? Les eaux du sol contiennent du bicarbonate de chaux, du nitrate de chaux et parfois du chlorure de calcium : que se produira-t-il si nous ajoutons l'un de ces sels à la solution de phosphate? Pour le savoir, j'ai composé des réactifs calciques mixtes qui ont été mélangés à des solutions très étendues d'humate alcalin... Il s'est formé, dans tous les cas, un précipité d'humate et d'humophosphate, et j'ai réussi à entraîner les moindres traces d'acide phosphorique — sans qu'il se fît du phosphate de potasse par double décomposition.

Ces conditions expérimentales sont de tous points semblables à celles du sol, et je crois avoir réalisé ainsi — du moins qualitativement (1) — la synthèse de la *matière noire active*. Selon la proportion de phosphate soluble, la richesse en acide phosphorique des composés humiques obtenus pourra varier sensiblement, et il y aura, suivant la composition du réactif précipitant, prédominance d'humate ou d'humophosphate.

Rétrogradation par absorption et précipitation. — On vient de voir que l'acide phosphorique soluble peut être absorbé directement par les matières humiques, ou précipité par les humates alcalins avec formation d'humophosphates. L'expérience montre que les *composés phospho-humiques* prennent ainsi

(1) Je dis *qualitativement,* parce qu'il n'est pas possible d'assigner à la matière noire des sols une composition fixe. Cette substance représente l'un des produits essentiels de l'activité chimique des terres, et sa richesse en humates et en humophosphates varie d'un milieu à l'autre.

naissance quand on produit un précipité humique extrêmement ténu, d'aspect gélatineux ou colloïdal, en présence de solutions phosphatées. De fait, tout se passe alors comme si une sorte de réseau très fin et très compact entraînait, dans sa chute lente, une partie des matériaux qui l'environnent. Bien que cette analogie soit plus apparente que réelle, peut-être n'est-il pas inutile, pour différencier nettement le sens du phénomène et éviter toute confusion, de nommer « *processus d'entraînement* » cette sorte de synthèse qui aboutit à la formation de composés phospho-humiques par une sorte d'*absorption à l'état naissant.*

Dans quelle proportion l'acide phosphorique est-il entraîné par la précipitation des matières humiques en milieu phosphaté ? Pour le savoir, j'ai effectué plusieurs séries d'expériences, soit avec *l'acide humique,* soit avec les *humates.*

Précipitation par l'acide phosphorique. — Dans cet essai, j'ai employé 50 cc. d'une solution d'humate potassique contenant un gramme d'acide humique ; la précipitation a été faite avec une liqueur dosant 2 gr. 336 d'acide phosphorique (en P^2O^5). En analysant le précipité et le liquide filtré, j'ai pu établir le partage de l'acide phosphorique. Voici les résultats obtenus :

Acide phosphorique introduit . . .	2,336
Acide phosphorique retrouvé (solution)	2,275
Acide phosphorique absorbé (précipité)	0,061

Pour 100 parties de l'acide phosphorique initial, il en a été absorbé 2,61 environ.

Par rapport à l'humus précipité, le *coefficient d'absorption* s'élèverait à plus de 6 °/₀; il est *deux fois* supérieur à celui que nous avons obtenu en immergeant l'acide humique dans une solution de phosphate monocalcique. Toutefois, comme les liqueurs phosphatées ne présentent

pas le même degré de concentration, — celle-ci étant dix fois plus riche, — il serait peut-être téméraire de vouloir tirer de cet essai des déductions *a priori*. Le pouvoir absorbant, d'une manière générale, croît avec la richesse des liquides, et cela suffirait, au besoin, pour expliquer les différences observées.

Précipitation par différents acides. — Quand une solution phosphatée d'humate potassique est précipitée par les acides forts, une partie de l'acide phosphorique se trouve entraînée inévitablement par l'humus; mais il ne semble pas qu'il y ait une relation très étroite entre la richesse des liquides primitifs et celle de l'acide humique ainsi obtenu. Pour démontrer ce fait, j'ai institué trois séries d'expériences dans lesquelles les proportions seules de phosphate variaient progressivement. Les 100 cc. d'humate contenaient 4 grammes de matières organiques; les doses d'acide phosphorique variaient de 0,2 à 1 °/₀. Les précipitations ont été faites par les acides *acétique*, *citrique*, *chlorhydrique* et *sulfurique*. Les analyses effectuées sur les cendres d'humus et dans les eaux résiduaires ont donné les résultats suivants (en grammes de P^2O^5) :

RÉACTIFS employés pour la précipitation de l'acide humique	SÉRIE A P^2O^5 introduit : 0,2 Ac. phosphor. dosé		SÉRIE B P^2O^5 introduit : 0,5 Ac. phosphor. dosé		SÉRIE C P^2O^5 introduit : 1,0 Ac. phosphor. dosé	
	Humus	Eaux	Humus	Eaux	Humus	Eaux
Acide acétique .	0,128	0,072	0,131	0,367	0,133	0,857
Acide citrique .	0,123	0,076	0,127	0,374	0,124	0,872
Acide chlorhyd.	0,131	0,069	0,136	0,362	0,126	0,855
Acide sulfuriq.	0,130	0,069	0,139	0,358	0,140	0,862

Il convient de remarquer que les proportions d'acide phosphorique entraîné par les précipités sont très peu différentes, bien que nous ayons ajouté les solutions de phosphate une semaine à l'avance. A partir d'une cer-

taine limite, les propriétés absorbantes de l'acide humique paraissent satisfaites : elles ne subissent plus de modifications appréciables, quelles que soient les doses de phosphate. Enfin, puisque l'absorption se manifeste même dans un milieu acide, où les phosphates devraient rester dissous, c'est une preuve péremptoire de l'existence des composés phospho-humiques. S'il s'agissait d'un simple entraînement mécanique, on trouverait des inégalités bien plus grandes d'une série à l'autre. Nous sommes donc en présence de combinaisons particulières, encore mal définies, mais d'une réelle importance au point de vue des propriétés fertilisantes de l'humus et des composés qui en dérivent.

S'il en est ainsi, on peut se demander pourquoi les acides humiques extraits de différentes terres ne possèdent pas, à poids égal, le même coefficient d'absorption à l'égard des phosphates ? Une semblable objection a été soulevée déjà pour contester le caractère chimique des propriétés absorbantes du sol : on peut répondre avec les mêmes arguments, puisque l'humus est un mélange complexe en voie de transformation. Et de même que nous trouvons dans le sol, à côté des débris rocheux qui continuent à se désagréger lentement, un des produits ultimes de la désagrégation — l'argile proprement dite — dont les propriétés absorbantes sont réelles; de même, à côté des matières végétales en voie de décomposition ou d'humification, nous rencontrons des composés humiques d'une nature particulière qui jouissent de facultés absorbantes — à l'instar de l'argile — et qui peuvent, au même titre, revêtir la forme colloïdale.

Or, le pouvoir absorbant de ces éléments très ténus est partiellement satisfait dans les conditions ordinaires, en sorte que la fixation de l'acide phosphorique — je devrais dire l'absorption d'une manière plus générale — telle que nous l'observons est essentiellement complémentaire. On ne mesure, en fait, que l'*absorption apparente*, et l'on comprend qu'elle puisse varier suivant que les substances humiques considérées auront fixé naturellement une proportion plus ou moins forte de phosphates. Ceci n'infirme en aucune façon l'existence des combinaisons spéciales.

Je vais encore plus loin : les acides servant à la précipitation attaquent en partie l'acide phosphorique combiné à l'humus, et ce serait une erreur de croire que la fraction entraînée par les précipités d'acide humique mesure exactement la fraction absorbée : les nombres sont toujours trop faibles.

Formation de la matière noire. — Nous savons déjà qu'en précipitant des humates alcalins par des composés calciques appropriés, on peut obtenir l'humate et l'humophosphate correspondants. Si l'on emploie un liquide contenant à la fois du nitrate de chaux (ou du chlorure de calcium) et du phosphate monocalcique, il se produit un mélange d'humate et d'humophosphate calciques. *C'est ce mélange qui correspond à la matière noire du sol.* Que l'on fasse varier la composition du réactif précipitant, soit en diminuant, soit en augmentant la dose de phosphate, et l'on obtiendra un précipité plus ou moins riche en acide phosphorique.

Ainsi, la constitution de la matière noire dépend à la fois de la nature et de la richesse des liquides employés à la précipitation.

Pour simplifier les choses, nous supposerons constante la composition de la solution humique... En ce cas, c'est la nature des eaux qui influe sur la composition de la matière noire. Si les eaux du sol sont littéralement dépourvues d'acide phosphorique, il se produira exclusivement des humates terreux (humate calcique surtout) ne contenant que le phosphore des composés humiques primitifs. Au contraire, si les eaux contiennent des phosphates solubles, il se formera des humophosphates, par précipitation directe, ou des composés phospho-humiques, par précipitation et absorption concomitantes. Étant donné que les eaux terrestres offrent une composition variable

d'un moment à l'autre, le même terrain peut engendrer une matière noire d'une valeur très inégale, suivant son état de fertilité, l'intensité de son coefficient digestif et la fréquence des fumures phosphatées.

Dans les sols doués d'une grande activité chimique, dans ceux où l'humus et les phosphates abondent, la matière noire se forme naturellement et accuse une richesse normale ; dans les terres pauvres, nécessitant l'apport des engrais phosphatés, l'emploi des superphosphates a pour principal effet d'assurer la formation des composés phospho-humiques.

Formation des enduits. — Les grains sableux, séparés de la terre par lévigation, sont ordinairement pourvus d'un enduit de revêtement. M. Schlœsing explique ainsi la formation de ces enduits persistants dont les matériaux constitutifs ont été dissous puis déposés sur les éléments du sol :

« Je commence par considérer la dissolution exis-
« tant dans une terre végétale. Elle contient des com-
« posés franchement solubles comme les nitrates,
« les chlorures, et d'autres très peu solubles ou
« réputés insolubles : la matière brune qui procède
« du terreau, les carbonate et bicarbonate de chaux,
« de magnésie ; des phosphates terreux, de la silice,
« de l'alumine, de l'oxyde de fer et de l'oxyde de
« manganèse. Son volume varie continuellement,
« sous les influences contraires de l'évaporation et
« des apports d'eaux de pluies ou d'irrigation. Pen-
« dant les variations de son volume, les composés
« très solubles, presque toujours en quantités relati-
« vement faibles, demeurent dissous en totalité, sauf
« le cas de sécheresse extrême ; mais il en est autre-
« ment des substances très peu solubles.

« Le sol en possède des réserves qui sont considé-
« rables par rapport aux quantités de ces substances
« existant à l'état dissous, et les réserves sont partout
« disséminées, en sorte que la dissolution est pour
« ainsi dire, en tout point, en contact avec elles et
« tend constamment à s'en charger dans les mêmes
« mesures. C'est bien ce qu'a observé et expliqué
« M. SCHLŒSING fils, en ce qui concerne l'acide phos-
« phorique dissous.

« Dans de telles conditions, la dissolution, toujours
« à peu près saturée des substances très peu solu-
« bles, doit en laisser déposer ou en dissoudre da-
« vantage, selon qu'elle est en voie de diminution ou
« d'accroissement de volume. On conçoit sans peine
« que, pendant les périodes de diminution, les sub-
« stances qu'elle abandonne se déposent sur les sur-
« faces du corps qu'elle baigne, c'est-à-dire sur les
« éléments du sol, sous la forme de couches extrê-
« mement minces. Mais ces couches seraient éphé-
« mères et disparaîtraient, pendant les périodes
« d'accroissement, si quelque cause n'intervenait
« pour les maintenir.

« Cette cause, je la vois dans une certaine attrac-
« tion exercée par les éléments du sol sur les sub-
« stances déposées à leurs surfaces. Je n'ai pas besoin
« de lui prêter l'énergie de celle qui préside aux phé-
« nomènes de teinture, où des matières colorantes
« solubles perdent absolument toute solubilité en se
« fixant sur des fibres. Il suffit qu'elle agisse à la
« façon de la capillarité, quand celle-ci, attirant les
« couches très minces d'eau qui enveloppent les par-
« ticules d'un corps en poudre humide, diminue
« leur tension de vapeur. Que l'attraction supposée
« diminue si peu que ce soit la solubilité des sub-
« stances déposées sur les éléments d'un sol, il n'en
« faut pas plus pour que l'on comprenne la forma-

« tion des enduits dont il s'agit. Car du moment que « les substances déposées sur les éléments du sol « sont devenues moins solubles, la dissolution s'est « trouvée plus que saturée à leur égard, et quand « son volume est entré en accroissement, c'est à « leurs réserves qu'elle s'est adressée pour complé- « ter son approvisionnement ; et ainsi, par des alter- « natives d'emprunts faits aux réserves et de dépôts « sur les éléments du sol, un transport s'est établi « des unes aux autres, jusqu'à ce que l'enrobage ait « acquis l'épaisseur au-delà de laquelle l'attraction « n'a plus agi (1). »

J'ai insisté précédemment sur la nature des *enduits*. Bien que la plupart des éléments dérivés concourent à la formation de ces revêtements protecteurs, je persiste à croire que la *matière noire*, dans la généralité des cas, en est le point de départ et le principe essentiel.

V. — Actions mobilisantes.

Grâce aux propriétés absorbantes du sol, certains principes fertilisants — à l'exception des nitrates, des sulfates et des chlorures solubles — contractent avec les éléments mécaniques dérivés des combinaisons irrégulières et encore mal définies qui ont pour effet de les immobiliser temporairement. Ces actions nettement conservatrices contrebalancent, en fait, les actions désagrégeantes et dissolvantes ; mais elles risqueraient d'amoindrir la fécondité naturelle de la terre arable, si les *actions mobilisantes* n'interve-

(1) C. R. de l'Académie, t. CXXXV, p. 601.

naient pas à temps pour libérer les matériaux retenus par l'argile et les composés humiques. Ce travail ultérieur de mobilisation se différencie à la fois par son caractère et son objet particuliers : il combat l'*affinité d'absorption* en remettant en circulation des principes qui sont *accidentellement passifs* (1).

Agents de mobilisation. — C'est surtout à l'eau chargée d'acide carbonique et de sels divers qu'incombe naturellement le travail de mobilisation. En principe, celle-ci se comporte à l'égard des *éléments dérivés* comme à l'égard des *éléments originels :* elle dissout de la potasse, de la chaux, de l'acide phosphorique, mais avec cette différence qu'elle agit plus facilement et donne lieu parfois à des substitutions chimiques.

Nous pouvons admettre, par exemple, que l'argile colloïdale saturée de potasse échange cette base contre de la chaux ou de l'eau, suivant que la mobilisation de l'alcali est l'œuvre d'un composé calcique ou de l'acide carbonique :

a) En présence du *chlorure de calcium,* un *silicate alumino-potassique* donnerait du *chlorure de potassium* et un *silicate alumino-calcique ;*

b) En présence de l'eau chargée d'*acide carbonique,* le même silicate donnerait du *carbonate de potasse* et un *silicate d'alumine hydraté.*

La première réaction n'est pas immédiatement

---

(1) Les ACTIONS DÉSAGRÉGEANTES s'exercent à l'égard des *composants originels* ou des débris rocheux primitifs ; les ACTIONS DISSOLVANTES provoquent la dissolution partielle ou intégrale de composés divers qui se retrouvent dans les liquides avec les mêmes caractères chimiques primitifs ; les ACTIONS MOBILISANTES, au contraire, comportent exclusivement la libération de principes fertilisants qui sont immobilisés par les propriétés absorbantes des *éléments dérivés.*

réversible : nous la supposerons normale et stable ; la seconde, au contraire, correspond à un système instable, puisque le silicate d'alumine hydraté absorbe le carbonate alcalin quand la proportion de gaz carbonique diminue. Ici, la mobilisation de la potasse peut n'être qu'apparente et temporaire, mais elle deviendra effective si le carbonate potassique se transforme sous l'influence de l'acide humique ou de tout autre composé susceptible de réagir.

Avec les solutions salines, même en l'absence du gaz carbonique, se produit-il des actions mobilisantes réelles ? Les expériences que j'ai faites permettent de répondre affirmativement, du moins en ce qui concerne les composés calciques solubles.

Mobilisation de la potasse. — Dans le sol, habituellement, la potasse revêt une forme insoluble. Elle appartient à des combinaisons complexes, polybasiques, qui l'abandonnent peu à peu sous l'influence de l'eau chargée d'acide carbonique, de bicarbonate de chaux ou de plâtre. A vrai dire, cet abandon peut n'être que momentané, à cause du pouvoir absorbant qu'exerce la terre arable à l'égard des carbonates alcalins ; cependant, quand l'*activité chimique* se manifeste, l'absorption est contrebalancée, et il s'établit alors un état d'équilibre mobile à la faveur duquel une fraction des matériaux solubilisés peut rester disponible.

A quel degré, dans quelle mesure les composés calciques opèrent-ils le déplacement et la solubilisation de la potasse ? Pour le savoir, j'ai entrepris une série d'expériences sur un sol granitique de la Creuse littéralement dépourvu de calcaire (1). Les essais ont

(1) Le choix de la terre n'est pas indifférent dans les essais de ce genre. Si les sels solubles de calcium, grâce à leur action

été effectués sur 100 grammes de terre fine et sèche. J'ai employé comparativement la chaux, le calcaire, le plâtre, le phosphate monocalcique ($P^2O^8H^4Ca$), le chlorure et le nitrate de calcium. Tous ces corps, chimiquement purs et préalablement analysés, furent appliqués à des doses équivalant à 1 °/₀ de chaux anhydre ; après les avoir mélangés à la terre, on ajouta partout une égale quantité d'eau ($0^{lit},20$).

En faisant varier seulement le temps de contact, j'ai observé, d'une manière générale, que les sels solubles agissent instantanément ou en temps très court. Ainsi, le plâtre et le chlorure de calcium ont donné respectivement :

	POTASSE MOBILISÉE (POUR 1000) APRÈS		
	24 heures	10 jours	4 mois
Plâtre.	0,048	0,073	0,096
Chlorure de calcium. .	0,115	0,115	0,115

A égalité de temps, les quantités de potasse mobilisée diffèrent considérablement, pour la même terre, suivant la nature des corps employés. Voici, à titre d'exemple, les nombres trouvés après un mois d'expérience :

mobilisante, forment des composés potassiques, il ne faut pas oublier que ceux-ci se dédoublent aussitôt dans les sols calcaires, pour former du carbonate de potasse qui est retenu, immobilisé par le pouvoir absorbant. Dans ces conditions, le phénomène de mobilisation se trouve masqué, il n'est guère possible d'en déterminer exactement l'intensité et le sens.

	Potasse mobilisée pour 1000 de terre	
	Globale	Excédents
Témoin (eau)	0,270	»
Plâtre pur	0,310	0,040
Chaux vive	0,340	0,070
Carbonate de chaux	0,420	0,150
Nitrate de calcium	0,430	0,260
Phosphate monocalcique	0,700	0,430
Chlorure de calcium	0,720	0,450

On voit combien sont grandes les différences d'action. Le *chlorure de calcium* et le *phosphate monocalcique* l'emportent de beaucoup : ils libèrent l'un et l'autre de fortes proportions d'alcali qu'on peut évaluer à **25 0/0**, par rapport à la potasse attaquable par l'eau régale, et à **5 0/0** par rapport à la potasse totale (1). Étant donnés les résultats obtenus, on est en droit de se demander s'il ne serait pas avantageux, pour apprécier la fraction de potasse assimilable contenue dans une terre, d'employer une solution calcique appropriée. J'ai entrepris sur ce point de nouveaux essais, mais la grosse difficulté réside dans le partage de la potasse *originellement passive* (qui n'a jamais été soluble) et de la potasse *accidentellement passive* (qui a été immobilisée par le pouvoir absorbant après avoir affecté la forme soluble). Or, l'action très inégale des sels calciques montre qu'ils n'ont pas, à égal degré, la même puissance de mobilisation et de désagrégation (2). Si quelques corps

(1) Ces évaluations sont faites en ne tenant compte que des excédents ; dans le cas contraire, elles deviendraient respectivement égales à 40 et à 8,53 °/₀, la terre dosant par kilogramme 1,8 de potasse soluble dans l'eau régale et 8,5 de potasse totale.

(2) Ces termes n'ont pas la même signification : la libération de potasse *essentiellement passive* est un *travail de désagrégation* qui

exercent à la fois une action mobilisante et une action désagrégeante, peut-être en est-il d'autres qui jouent exclusivement le rôle de mobilisants. Ce sont ceux-là qui nous renseigneront le plus utilement.

Je voudrais, en passant, appeler l'attention sur les effets du phosphate monocalcique. En 1893, à la suite de quelques expériences culturales, je n'hésitais pas à attribuer la supériorité des superphosphates — en sols silico-argileux, très pauvres en chaux mais riches en humus — à l'action mobilisante du plâtre. Depuis lors, un agronome italien, M. N. Passerini, a montré que le phosphate monocalcique mobilise très bien la potasse du sol. M. Dusserre attribue la même propriété au superphosphate et au nitrate de soude (1) ; les sels ammoniacaux agissent dans le même sens. Dans les terres de la Creuse, où l'on emploie avec avantage le superphosphate, de préférence aux engrais phosphatés, cette faculté de mobilisation, qui a pour effet de rendre plus facilement assimilable la potasse inerte des éléments sableux, mérite d'être prise en considération ; elle suffirait, au besoin, pour expliquer la faveur dont jouissent les superphosphates, dans les régions granitiques, où l'acide phosphorique fait presque toujours défaut.

Pour compléter utilement ces essais, j'ai étudié la mobilisation de la potasse contenue dans les éléments *sableux* et *argileux* provenant de la même terre. J'ai opéré sur des échantillons de 10 grammes additionnés de 40 centimètres cubes d'eau distillée et d'une proportion de sels calciques équivalente à un

porte, en effet, sur les débris rocheux incomplètement altérés ; au contraire, la libération de la potasse *accidentellement passive* constitue un *travail de mobilisation.*

(1) Je crois me rappeler que le même fait avait été signalé par Warington, en ce qui concerne le nitrate de soude.

gramme de chaux anhydre. Voici les résultats obtenus avec les divers éléments :

	POTASSE MOBILISÉE POUR 100		
	Sable grossier	Sable fin	Argile
Témoin (eau). . . .	0,105	0,168	0,132
Chaux vive	0,184	0,195	»
Plâtre pur.	0,185	0,184	0,132
Nitrate de calcium. .	0,124	0,193	»
Chlorure de calcium .	0,278	0,232	0,350

L'expérience a duré 34 jours pour les sables et 6 jours pour l'argile qui fut soumise seulement à l'action du plâtre et du chlorure de calcium. En tenant compte de la richesse potassique de chacun des éléments (**1,35** pour le sable grossier, **0,58** pour le sable fin, et **0,51** pour l'argile), on trouve que sur 100 parties de potasse, il en a été mobilisé :

	Sable grossier	Sable fin	Argile
Témoin	7,9	28,9	25,9
Chaux	13,8	33,6	»
Plâtre	7,9	32,7	25,9
Nitrate de calcium	9,2	33,2	»
Chlorure de calcium . . .	20,9	40,0	68,6

L'effet du *chlorure de calcium* est encore des plus manifestes ; contrairement au *plâtre* et au *nitrate de chaux,* il libère de la potasse, dans tous les cas, et exerce, à la fois, une action de désagrégation et de mobilisation.

On remarquera, en outre, l'inégale résistance de la potasse suivant qu'elle appartient aux éléments grossiers ou aux éléments fins. Si nous prenons pour

base de comparaison les sels calciques solubles dont l'action est presque instantanée, — ce qui permet de négliger le temps — nous voyons que le chlorure de calcium a mobilisé 40 °/₀ de la potasse contenue dans le sable fin et 68 °/₀ de la potasse contenue dans l'argile. La différence de finesse des éléments suffit-elle pour expliquer les écarts observés ? N'y aurait-il pas lieu de tenir compte aussi de l'état de la potasse et de la nature de l'enduit ?

Il y a quelques années déjà, en étudiant l'action des acides sur les matières silicatées du sol, j'avais été frappé de voir que les sols les plus riches en potasse totale n'étaient pas toujours ceux qui donnaient la plus forte proportion de potasse attaquable. Par contre, des alluvions marneuses, contenant jusqu'à 70 °/₀ de calcaire — avec 25 °/₀ environ de débris silicatés très fins (sable et argile) — accusaient de 5 à 7 millièmes de potasse attaquable par l'acide azotique. C'est pour interpréter cette anomalie singulière que j'ai pris l'habitude de distinguer la potasse originellement passive, qui se montre très résistante aux réactifs habituels, et la potasse accidentellement passive ou immobilisée par le pouvoir absorbant, qui possède une très faible résistance à l'égard des agents de mobilisation.

Ainsi, dans un sol où l'activité chimique est intense, les fins débris rocheux de nature feldspathique, par exemple, ont pu subir la désagrégation intégrale : il s'est fait alors de l'argile pure, et toute la potasse a été solubilisée à un moment donné ; seulement, en raison du pouvoir absorbant, les éléments argileux n'ont pas conservé leur pureté : ils ont repris le carbonate de potasse et immobilisé l'alcali en lui donnant une forme nouvelle, bien différente de celle qu'il possédait dans l'élément feldspathique primitif. On comprend, dès lors, qu'une terre très décompo-

sée ou très désagrégée, même fortement calcaire ou faiblement siliceuse, accuse une proportion de potasse attaquable bien supérieure à celle qui peut exister dans un sol plus riche cependant en éléments silicatés, mais dans lequel ces éléments ont conservé tous leurs caractères physico-chimiques originels.

Mobilisation de la chaux. — Les actions mobilisantes s'exercent également à l'égard de la chaux qui s'est substituée à la potasse de l'argile colloïdale. Cette substitution, ayant pour résultat de modifier la nature des éléments argileux et de combattre leurs propriétés colloïdales, expliquerait, selon nous, l'action physique des amendements calciques. Nous avons montré comment, sous l'action des sels de chaux, les silicates alumino-potassiques dérivés se transformaient en silicates alumino-calciques ; il convient d'examiner maintenant par quel mécanisme la chaux ainsi combinée peut faire retour à la circulation.

L'expérience montre que les feldspaths riches en chaux se désagrègent avec plus de facilité que les autres. Dès lors, on peut admettre que l'acide carbonique réagira aisément sur notre silicate alumino-calcique formé par voie humide ; il se produira du calcaire ou du bicarbonate de chaux et un silicate d'alumine hydraté. S'il en était autrement, les propriétés absorbantes de l'argile disparaîtraient à jamais.

Ainsi, au lieu d'admettre la réversibilité des actions mobilisantes, en supposant que la potasse déplace ou mobilise la chaux du silicate alumino-calcique — nous pensons que ce corps se désagrège, cède sa chaux et à l'acide carboniquere devient alors capable d'absorber de nouvelles quantités d'alcali.

Cette raison seule nous oblige à reconnaître la

réalité des actions mobilisantes pour la libération de la chaux appartenant aux silicates dérivés : à l'argile non colloïdale.

Mobilisation de l'acide phosphorique. — Il semble que l'argile, sous certaine forme, puisse fixer des phosphates dissous. — M. Th. Schlœsing a montré la progression croissante de l'acide phosphorique et du fer, suivant la finesse des éléments sableux et argileux. (Voir tableau, p. 70.) Ces corps forment-ils simplement un enduit autour des fines particules ou sont-ils combinés avec l'argile? On ne saurait le dire encore... Ce que nous savons bien, c'est que les phosphates dérivés (l'enduit se formant par précipitation) peuvent concourir à la nutrition végétale. Par ce fait même, ils sont susceptibles d'entrer en circulation, d'être mobilisés.

Ainsi, les actions mobilisantes se manifestent dans tous les sols chimiquement actifs. Sans elles la majeure partie des aliments minéraux resterait à l'état passif, notamment dans l'argile, et la végétation s'en ressentirait d'autant plus que les actions désagrégeantes seraient moins intenses.

VI. — Transformations chimiques.

Tous les phénomènes que nous venons d'étudier concourent, en somme, vers un double but : les uns, *de sens progressif*, ont pour mission de libérer les principes fertilisants en les rendant assimilables : ils préparent ainsi les solutions nourricières que les plantes utilisent par la suite ; les autres, *de sens régressif*, tendent vers la constitution des réserves par absorption et précipitation intégrale, ou partielle, des

matériaux dissous. Le *pouvoir absorbant,* parfois très limité, ne suffirait pas à l'atténuation des pertes par entraînement dans les sols doués d'une grande activité chimique; il est donc fort heureux que les diverses transformations *régressives* et *progressives* soient subordonnées les unes aux autres, et qu'elles tendent simultanément vers la production et la conservation des richesses naturelles contenues dans la terre arable.

Coordination des travaux. — L'eau chargée d'acide carbonique *désagrège, dissout* et *mobilise.* Pratiquement, il est à peu près impossible de délimiter ces effets et d'établir la part qui revient à chacun d'eux. Les actions chimiques du sol se trouvent ainsi coordonnées dans leurs manifestations, et il s'établit entre elles des limites et des états d'équilibre qui assurent, dans la mesure possible, le maintien de la fertilité et la conservation des matériaux utiles.

Considérons une petite masse terreuse humide formée de sable granitique, de calcaire pulvérulent, de phosphates et de débris végétaux en voie d'humification. Sous l'influence des ferments, les matières organiques s'altèrent et engendrent de l'acide carbonique. Aussitôt la kaolinisation commence : il se fait de l'argile et du carbonate de potasse qui attaque les matières humiques... S'il y a excès d'acide, l'eau se charge en même temps de bicarbonate de chaux, de phosphates, etc. Nous avons alors sous nos yeux un système complexe comprenant :

Ⓐ Des MATIÈRES SOLIDES : *quartz, feldspath, mica, argile, calcaire, débris organiques* humifiés ou non;

Ⓑ Des MATIÈRES FLUIDES : *air, acide carbonique* et *eau* contenant ou ayant contenu de l'humate potassique, du bicarbonate et du phosphate de chaux, du carbonate de potasse, etc...

Comment ces divers composés réagissent-ils les uns sur les autres? Supposons inertes les éléments originels, que nous retrouverons intacts dans le premier agrégat terreux... Nous allons voir se manifester d'abord des *actions absorbantes* entre Ⓐ et Ⓑ, puis des *actions précipitantes* entre les composés dissous du système Ⓑ. L'argile et l'humus vont immobiliser une partie de la potasse et de l'acide phosphorique, tandis que l'humate potassique, réagissant sur les composés calciques, engendrera un mélange d'humates et d'humophosphates formant la *matière noire*. Ces réactions, qui se produisent ordinairement à l'*état naissant*, masquent la dissolution des matières humiques, et c'est grâce à elles que les eaux terrestres sont moins chargées de composés organiques que de sels minéraux.

Ainsi prennent naissance les réserves du sol.

Du même coup, l'argile coagulée et les composés humiques précipités agglutinent les grains sableux et provoquent la formation des agrégats terreux. A dater de ce moment, les actions désagrégeantes et absorbantes se trouvent à vrai dire suspendues, tandis que les actions dissolvantes et mobilisantes seules entrent en jeu. Nous avons sous les yeux un agglomérat revêtu d'un enduit d'épaisseur variable, mais toujours relativement faible, qui se trouve au contact d'une couche d'eau entourée d'une enveloppe d'air. Et comme ces couches sont en rapport direct, il s'établit entre elles un état d'équilibre mobile qui est caractérisé par des échanges d'acide carbonique et de vapeur d'eau.

Dans les sols fertiles, où l'enduit est riche en matière noire et en humophosphates, la couche aqueuse peut se trouver saturée; si son volume diminue, des matériaux se reprécipitent en partie et font retour à la réserve, à l'enduit; dans le cas contraire, si le

degré d'humidité augmente, une nouvelle quantité de matière noire entre en dissolution ; il en sera de même, d'ailleurs, si l'appauvrissement de l'eau est provoqué par la végétation.

De fait, la coordination des actions chimiques est parfaite... Les *actions désagrégeantes,* si elles se manifestaient seules, appauvriraient inévitablement le sol ; mais leurs effets sont contrebalancés par les *actions absorbantes* et *précipitantes* qui retiennent ou immobilisent les matériaux rendus solubles. A quel degré et dans quel sens ces actions interviennent-elles ? On conçoit très bien que les substances fixées par l'humus, même quand elles ne sont pas utilisées par la végétation, fassent retour à la circulation, en fin de compte, lorsque la matière organique a disparu sous l'action des ferments. Mais comment les principes absorbés par l'argile sont-ils libérés ? C'est ici qu'apparaît la nécessité, la grande utilité des actions mobilisantes. Voici une particule de feldspath à base d'alumine, de chaux et d'alcali ! Quand le travail de désagrégation est complet, intégral, nous obtenons un résidu insoluble formé de silice, d'alumine, de calcaire et surtout d'argile pure très appauvrie en alcali. Le feldspath a disparu comme type chimique ou minéralogique, et les espèces nouvelles qui ont pris naissance constituent le système : *argile, calcaire* et *carbonates alcalins*... Ces derniers, nous venons de le voir, peuvent réagir sur l'humus, mais des actions secondaires les remettront en circulation. D'ailleurs, si l'humus ne se trouve pas à portée, c'est l'argile qui retient les alcalis avec lesquels elle forme une sorte de silicate double d'alumine et d'alcali différant du feldspath originel par sa constitution chimique et son mode de formation (voie humide). Bien que la potasse immobilisée offre une moindre résistance, elle resterait indéfiniment passive en

l'absence de l'action mobilisante des eaux chargées d'acide carbonique, de sels calciques ou même de composés sodiques.

Théorie de l'absorption. — Les connaissances que nous venons d'acquérir nous permettent d'expliquer le mécanisme de l'absorption. On a cru longtemps que le *pouvoir absorbant* était le résultat d'une sorte d'attraction physique. L'expérience montre qu'en précipitant un sel d'alumine, au sein d'une solution colorée par de la cochenille, il se forme une *laque carminée* dont la coloration rose, très persistante, résiste à des lavages prolongés. Frappé de ce fait, Chevreul émit l'idée que le colorant était fixé à la matière alumineuse par *affinité capillaire*, et cette ingénieuse hypothèse servit de base à la théorie de l'absorption... Mais de semblables phénomènes se produisent-ils dans le sol ? La décoloration du purin, observée successivement par Gazzeri et Huxtable, est-elle sous la dépendance exclusive des propriétés absorbantes ? Et si la terre arable peut être comparée à un corps poreux, son action ressemble-t-elle de tous points à celle du charbon ou du noir animal ?

Nous ne le croyons pas !

A nos yeux, le « pouvoir absorbant » constitue plutôt un phénomène chimique... C'était l'opinion de Way, qui admettait la formation de silicates complexes dont il avait réalisé la synthèse ; c'est aussi l'opinion de MM. Van Bemmelen et P. de Mondésir. Toutefois, Brustlein soutint la théorie contraire. « Si l'absorption des alcalis est la conséquence d'une action chimique, disait-il en substance, on ne s'explique pas pourquoi la substitution des bases ne se fait pas toujours dans le rapport des équivalents... Une terre qui absorbe 17 parties d'ammoniaque

devrait fixer 40 parties de soude et 56 de potasse. Or, il n'en est pas ainsi : il ne saurait donc y avoir combinaison, comme l'affirme Way. »

Cet argument n'est que spécieux ; il ne tient pas compte de ce que j'appellerai la satisfaction naturelle du pouvoir absorbant à l'égard d'une base donnée. Voici, par exemple, un sol dont les propriétés absorbantes sont partiellement satisfaites pour la potasse ; il pourra fixer encore une petite quantité de ce corps ; mais si nous faisions réagir l'ammoniaque ou la soude, ces corps seront-ils absorbés dans le rapport 56 à 17 ou à 40 ? Oui, si l'absorption était intégrale, c'est-à-dire si le sol considéré ne contenait ni potasse, ni soude immobilisées ; non, si la terre contient naturellement de la potasse ou de la soude. Il faut aussi tenir compte du déplacement possible d'une base par l'autre. Si l'ammoniaque et la soude se substituent partiellement à la potasse, comme l'établissent nos expériences et celles de différents agronomes, l'absorption ne pourra s'effectuer suivant le rapport des poids moléculaires. En fait, la question est plus complexe qu'on ne le suppose.

On a invoqué un autre argument. Si l'absorption résulte d'une combinaison chimique, pourquoi les sels de potasse subissent-ils, en présence du calcaire, une transformation contraire aux lois de la chimie ? Pourquoi le sulfate et le chlorure de potassium réagissent-ils sur le calcaire, pour donner du carbonate de potasse et des sels calciques solubles, alors que dans les laboratoires nous produisons une réaction inverse ? On obtient, en effet :

Dans le sol :

$$SO^4K^2 + CO^3Ca = SO^4Ca + CO^3K^2$$
$$2KCl + CO^3Ca = CaCl^2 + CO^3K^2$$

Dans le laboratoire :

$$SO^4Ca + CO^3K^2 = CO^3Ca + SO^4K^2$$
$$CaCl^2 + CO^3K^2 = CO^3Ca + 2KCl$$

Pour interpréter ces faits, M. de Mondésir émet l'opinion suivante : « Ce n'est pas le calcaire qui est nécessaire à la décomposition des solutions salines par le sol ; c'est l'existence d'humates ou de silicates polybasiques, parmi lesquels dominent ordinairement ceux de chaux. Quand on lave une terre à l'acide, on détruit ces composés ; quand on la porte ensuite à l'ébullition, avec une dissolution de bicarbonate de chaux, on les reforme. En faisant ainsi tour à tour disparaître et reparaître dans la terre les corps polybasiques, on lui retire et on lui rend la faculté de décomposer les solutions salines. Mais le carbonate de chaux n'est pour rien dans cette décomposition.

« La chaux n'est pas même la base nécessaire à laquelle doivent se substituer celles que la terre enlève aux solutions salines. Il arrive que, dans une terre, on puisse à volonté fixer telle ou telle base à la place de telle ou telle autre. Quand on traite une terre calcaire par une solution de sel marin, on y produit une absorption de soude avec élimination de chaux ; si ensuite, après l'avoir lavée à l'eau, on l'agite avec une solution de sulfate de chaux, on donne naissance à du sulfate de soude avec fixation de chaux (1). »

Ainsi le pouvoir absorbant de la terre végétale tiendrait essentiellement à la propriété que possèdent la matière organique et aussi l'acide silicique d'être polybasiques, de prendre les bases qui leur sont

(1) Th. Schlœsing fils : *Précis de Chimie agricole*, librairies Masson et Gauthier-Villars.

offertes par simple addition si elles sont libres, par double échange si elles sont à l'état salin. M. Van Bemmelen conclut de ses recherches « que les propriétés absorbantes appartiennent surtout aux matières colloïdales du sol : silicates, oxyde de fer, acide silicique, substances humiques... »

Il y a donc une certaine analogie entre les deux opinions. En vérité, on tourne plutôt la difficulté sans la résoudre. M. de Mondésir ne croit pas indispensable l'intervention du calcaire, parce qu'il lui paraît illogique d'admettre qu'il puisse se former un carbonate alcalin, contrairement aux lois de Berthollet ; mais il admet que le sulfate de potasse réagit sur l'humate de chaux pour former un humate complexe polybasique. Ce point est exact et conforme à des réactions connues : les carbonates, les sulfates et les silicates de potasse et de soude attaquent l'humate de chaux et le dissolvent ; mais les chlorures n'agissent pas de la même manière : ils sont sans action sur les humates insolubles, bien qu'ils se transforment en carbonates, dans le sol, en présence du calcaire. Sur ce fait, l'hypothèse précédente se trouve en défaut. Il nous paraît plus simple d'admettre que la terre arable est le siège de réactions chimiques diverses qui se produisent tantôt suivant les lois connues, tantôt suivant des lois spéciales qui sont subordonnées à *l'affinité d'absorption*.

Nous poserons en principe *que les propriétés absorbantes directes, au même titre que les actions précipitantes, sont des manifestations chimiques normales*, c'est-à-dire soumises aux lois ordinaires des combinaisons. Restent les échanges de bases et certaines doubles décompositions qui sont parfois contraires et anormales. Examinons brièvement ces différentes transformations.

Transformations normales. — L'absorption des alcalis et des carbonates alcalins incorporés directement à la terre donne lieu à des combinaisons régulières dont les manifestations sont plus aisément saisissables... On peut admettre que les bases alcalines libres sont fixées par l'acide humique (qu'elles saturent) et par les éléments colloïdaux dérivés d'origine minérale : argile, alumine, silice hydratée. Partant de cette hypothèse, j'ai supposé que les carbonates alcalins devaient se comporter de même et donner lieu, en abandonnant leur base, à un dégagement appréciable d'acide carbonique.

L'expérience montre que les composés absorbants du sol agissent comme des corps faiblement acides et susceptibles, par cela même, de décomposer les carbonates. Cette propriété étant depuis longtemps reconnue pour l'acide humique, mes essais ont porté sur le sable fin et l'argile séparés de la terre, ainsi que sur d'autres substances pouvant se former dans la désagrégation des masses rocheuses (1).

Voici les résultats obtenus :

	ACIDE CARBONIQUE DOSÉ (en milligr.)
Argile normale (4 gr.)	15,90
Argile calcinée (4 gr.)	20,98
Kaolin normal (4 gr.)	0,54
Kaolin lavé (4 gr.)	0,56
Alumine précipitée (4 gr.)	19,81
Hydrate ferrique (4 gr.)	9,80
Silice précipitée (4 gr.)	3,27
Sable fin (20 gr.)	0,00

(1) Un poids connu de matière était placé dans un col droit pouvant être bouché hermétiquement; la solution étendue de carbonate se trouvait dans un petit tube disposé verticalement dans le flacon. On faisait le vide à la trompe à mercure, puis on décantait le liquide sur la matière : après un temps déterminé, les gaz étaient recueillis, mesurés, et l'on y dosait l'acide carbonique.

Ces intéressantes recherches montrent manifestement que les éléments sableux du sol (sable fin) n'exercent aucune action décomposante sur les carbonates alcalins, quand ils sont purs, tandis que l'argile, même calcinée, réagit énergiquement comme l'alumine hydratée (1). Le kaolin, dont les affinités absorbantes sont presque satisfaites, provoque un très faible dégagement d'acide carbonique.

On voit ainsi que l'absorption directe des alcalis et des carbonates alcalins donne lieu à des réactions chimiques. Pour les humates et les phosphates, bien qu'il ne se produise aucun dégagement gazeux — ces corps n'étant pas décomposables — il se fait aussi des combinaisons spéciales en raison même de la constitution de l'argile.

Transformations anormales. — Les cas d'absorption indirecte sont toujours précédés, ainsi que nous l'avons vu, d'un échange de bases : *le sel alcalin se*

---

(1) Pour expliquer les propriétés absorbantes de l'argile, nous admettrons, avec M. Maquenne, que sa molécule renferme quatre oxhydriles (OH) à fonction acide ou basique, suivant leur position par rapport au groupement pyrosilicique. La formule décomposée du silicate d'alumine $[2(SiO^2)Al^2O^3 2(H^2O)]$ peut se mettre sous l'une des formes

$$
\begin{array}{lcl}
(1)\ HO - Si \genfrac{<}{>}{0pt}{}{O}{O} Al - OH\ (3) & & Si \genfrac{<}{>}{0pt}{}{O}{O} Al \genfrac{<}{}{0pt}{}{OH\ (1)}{OH\ (2)} \\
O < \qquad\qquad | & \text{ou} & O < \qquad\qquad | \\
(2)\ HO - Si \genfrac{<}{>}{0pt}{}{O}{O} Al - OH\ (4) & & Si \genfrac{<}{>}{0pt}{}{O}{O} Al \genfrac{<}{}{0pt}{}{OH\ (3)}{OH\ (4)}
\end{array}
$$

La première formule contient deux oxhydriles acides (1) et (2) et deux oxhydriles basiques (3) et (4) ; les alcalis se combinent aux premiers, tandis que les sels acides (phosphate monocalcique) et les composés humiques s'unissent aux seconds. Dans la seconde formule, les oxhydriles appartiennent exclusivement à l'alumine : ils sont plutôt à tendance basique, et nous préférons, bien que l'hydrate d'alumine puisse former des humates alcalins, adopter le premier type pour la clarté de nos démonstrations.

transformant en carbonate. Pour interpréter les doubles décompositions ou l'action des sels sur les sels, on invoque souvent les lois de Berthollet qui reposent sur la formation de composés plus insolubles ou plus volatils. Actuellement, comme ces lois ne sont pas absolues, on applique le *principe du travail maximum.* C'est par la quantité de chaleur dégagée qu'on mesure l'affinité — du moins en ce qui concerne l'énergie chimique actuelle — et que l'on prévoit la possibilité de telle ou telle réaction. Dans le sol où les actions sont lentes et peu sensibles, la mesure des calories devient impossible. On ne saurait donc affirmer si toutes les transformations sont régies par les lois thermiques des combinaisons. A l'exception des actions précipitantes, il semble que les doubles décompositions soient irrégulières et anormales.

Traitons un sol argilo-calcaire par une solution saline étendue (nitrate de soude ou chlorure de potassium) et analysons ensuite, après plusieurs jours, les liquides décantés ou filtrés. Ils accuseront sensiblement le même titre en azote nitrique et en chlore, mais combien différente la proportion d'alcali ! Il s'est produit un appauvrissement réel, ce qui nous permet de dire qu'une notable partie de la potasse et de la soude a été retenue par la terre. Par contre, la chaux abonde dans les eaux, et nous sommes presque en droit d'affirmer qu'elles contiennent surtout du chlorure et du nitrate de calcium. Voilà un premier fait dénotant un *échange de bases.*

Traitons la même terre par une solution colorée d'humate potassique. Nous remarquerons que le liquide filtré est très légèrement ambré, et nous en conclurons que l'humate a dû être précipité à l'état d'humate de chaux. Si nous remplaçons l'humate alcalin par une solution de sulfate d'ammoniaque, et

que nous placions un papier de tournesol rouge dans l'atmosphère du ballon, nous observons que le papier ne tarde pas à bleuir parce que le calcaire réagit sur le sel ammoniacal en provoquant un dégagement d'ammoniaque ou de carbonate d'ammoniaque volatil et facilement dissociable.

Qu'on répète les mêmes essais avec une terre granitique littéralement dépourvue de calcaire, et toutes les réactions précédentes deviendront négatives. La solution d'humate alcalin, seule, pourra subir une décoloration partielle en raison de l'affinité que possèdent les colloïdes minéraux — l'argile notamment — pour les matières humiques dérivées. Le même sol additionné de calcaire se comportera tout autrement; il acquerra presque toutes les propriétés du premier.

Les dernières réactions sont conformes aux lois générales de la chimie : l'humate alcalin est précipité par le bicarbonate de chaux, par le plâtre et les sels solubles de calcium ; le chlorhydrate et le sufate d'ammoniaque sont décomposés par le calcaire pur. Il n'y a là rien de particulier. Ces phénomènes sont subordonnés à la proportion des corps réagissant, et si les circonstances restent défavorables, ils se produiront indéfiniment dans le même sens : *ils sont illimités.*

La transformation des sels de potasse et de soude n'est pas du même ordre : *elle est limitée,* parce qu'elle dépend du pouvoir absorbant. Dès que la terre est saturée d'alcali, dès que l'absorption est intégralement satisfaite, les doubles décompositions cessent de se produire ou changent de sens. Si je verse du chlorure de potassium sur le sol calcaire, il ne peut pas passer de potasse, au début, quand on emploie des solutions très étendues; mais si j'augmente la dose de sel, celui-ci s'échappe dans les

eaux de lavage : il n'est plus décomposé. Ce n'est pas la proportion de carbonate de chaux qui règle la transformation du sel alcalin, puisqu'elle cesse bien avant que tout le calcaire soit décomposé. Au reste, l'expérience m'a montré que dans un sol préalablement traité par du carbonate de potasse, de façon à satisfaire les affinités absorbantes, le dédoublement des engrais potassiques ne se produit plus, quelle que soit la richesse en calcaire, aussi longtemps que l'absorption demeure satisfaite.

Les nombreuses expériences que j'ai effectuées, même sur les sols stérilisés, concordent parfaitement. D'où je conclus : *que le pouvoir absorbant commande et limite toutes les réactions qui sont contraires*, en fait, *aux lois de* Berthollet. Il n'y a pas lieu d'en être autrement surpris, quand les sels réagissent en présence de substances colloïdales complexes : argile, matière noire, etc...

Ainsi, dans le sol, à côté de l'affinité chimique proprement dite, qui doit déterminer des réactions de même nature que celles que nous observons au laboratoire, il faut considérer l'affinité d'absorption. Si la première se manifeste seule, le phénomène observé est normal ; dans le cas contraire, la seconde l'emporte, et la réaction devient anormale. Cela étant, la loi des actions chimiques peut s'exprimer ainsi :

« Quand différents sels solubles sont en présence, dans une terre donnée, ils se dédoublent, conformément aux lois de la chimie, s'il ne doit pas en résulter un composé susceptible d'être absorbé par les éléments du sol ; dans le cas contraire, la double décomposition change de sens, mais elle ne se manifeste que s'il doit en résulter la production d'un corps mieux retenu par les propriétés absorbantes

du sol considéré, celles-ci étant alors les causes efficientes et limitatives du phénomène. »

Ce principe général permet d'interpréter d'une manière satisfaisante l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent au sein de la terre arable, mais nous devons éviter de lui donner un caractère trop absolu. Il ne saurait avoir force de loi aussi longtemps que la science n'aura pas expliqué tous les cas particuliers de l'absorption et notamment ceux qui se rattachent à *la chimie des colloïdes*.

Aperçu théorique. — Pour bien comprendre le rôle essentiellement conservateur du sol à l'égard de certains matériaux alimentaires, pour saisir le mécanisme des propriétés absorbantes — abstraction faite des phénomènes relatifs à l'action des sels sur les sels ou leurs constituants — il faut se rappeler :

1° Que la terre arable renferme des composants originels et des composants dérivés cristallins, amorphes ou colloïdaux ;

2° Que les particules terreuses sont entourées d'une couche liquide d'épaisseur variable contenant des sels minéraux en solution étendue et des colloïdes dissous ou en suspension ;

3° Que les éléments absorbants du sol possèdent un *pouvoir sélectif*, car ils ne retiennent pas au même degré les matières solubles avec lesquelles ils sont en contact.

Si l'on admet que les solutions salines de faible concentration contiennent des sels partiellement ou totalement *ionisés* (1) en *ions acides* (négatifs) et *ions basiques*

---

(1) D'après la théorie de Svante Arrhénius, les solutions électrolytes étendues (formées de sels susceptibles d'être décomposés par le courant électrique) contiendraient toujours des *ions* libres. Le chlorure de potassium donnerait ainsi des *ions de chlore* (négatifs) et des *ions de potassium* (positifs). Sous l'influence de l'électricité, qui exercerait une action dirigeante, les premiers se

(positifs), on conçoit la possibilité d'une sélection exercée par les matières absorbantes sur les constituants des corps dissous... Et il n'est pas suprenant qu'une solution de chlorure de potassium (neutre ou tournesol), versée goutte à goutte sur un filtre de terre ou de kaolin, se convertisse en un liquide à réaction nettement acide : les ions de potassium étant fixés de préférence aux ions de chlore (1). En fait, ce *pouvoir sélectif* n'est qu'une particularité du *pouvoir absorbant*... Il n'en explique pas les causes, et la question reste entière.

Pourquoi une solution donnée s'appauvrit-elle au contact des particules terreuses ? Comment se produisent les variations de concentration ou de densité des liquides du sol ? Ainsi que je l'ai dit autre part, les changements de composition chimique observés dans une dissolution qui mouille ou qui traverse la terre ne mesurent pas l'intensité de l'absorption... Pour s'en convaincre, il faut distinguer les actions, sérier les effets, en créant des milieux appropriés à chaque genre d'observation.

a) Influences physiques. — Prenons un milieu inerte essentiellement constitué par du sable quartzeux grossier tamisé et formons des lots pour les portions passant aux tamis compris entre les n°s 20 et 60. Plaçons ces sables

---

rendraient au pôle positif ou à l'anode (anions) et les seconds au pôle négatif ou à la cathode (cathions). Les solutions décomposables par l'électrolyse ont reçu le nom d'électrolytes ; elles sont diffusibles et obéissent aux lois générales de l'osmose (leurs constituants sont des *cristalloïdes*), ce qui les différencie des *solutions colloïdales* ou pseudo-solutions qui n'ont pas de pression osmotique, conduisent mal l'électricité et sont précipitées ou coagulées par une quantité de réactif qui n'a jamais besoin d'être en rapport absolu avec le poids des molécules en présence. Les *suspensions colloïdales* se comportent comme les pseudo-solutions ; il convient d'ajouter cependant que le courant électrique peut déterminer un mouvement des particules vers l'un ou l'autre pôle : elles sont alors *positives* ou *négatives*.

(1) Cette expérience réussit bien dans les sols non calcaires où la formation du chlorure de calcium devient impossible (J. Dumont).

(respectivement numérotés) dans des manchons de verre d'égale dimension (0 m. 05 de diamètre et 0,25 de hauteur) et arrosons-les avec des solutions salines titrées à quelques millièmes... En analysant les liquides filtrés, nous n'observons aucune variation appréciable du titre : il n'y a pas eu d'absorption. Poursuivons encore ces recherches avec des matériaux plus fins, mais toujours de même nature (sable quartzeux chimiquement inerte). Nous observons bientôt une légère variation de titre qui va croissant, pour un même poids de sable, avec le degré de finesse des grains (tamisage effectué dans la série des nos 120 à 200). Etant donné que la nature minéralogique du sable n'a pas changé, nous attribuons l'appauvrissement de la solution saline à une action physique devenue plus apparente par suite de l'augmentation considérable des surfaces de contact avec le corps dissous. C'est alors la *tension superficielle* qui se manifeste, non seulement entre le liquide et le solide, mais aussi entre le corps dissous, le solvant et le solide. L'attraction du solide pour le sel nous intéresse seule. Quand elle se manifeste visiblement, tout se passe comme s'il se formait au contact de la particule solide une sorte de pellicule aqueuse où les sels viennent se concentrer ou se diluer... Voici comment le célèbre physicien J. Thomson explique le sens des variations :

« Si la tension superficielle augmente quand on ajoute un « sel, on remarque qu'il y a moins de sel par unité de « volume de la pellicule liquide que par unité de volume « de la masse du reste du liquide. Mais si l'addition du « sel amène une diminution de cette tension superficielle, « c'est le contraire qui se produit... Nous avons remarqué « que la tension superficielle d'une solution, en contact « avec un solide, diminue à mesure que le titre de cette « solution augmente : *la pellicule liquide* contient alors « plus de sel par unité de volume que la masse même du « liquide. »

Le quartz passant au tamis de soie n° 240 (le plus fin que nous ayons pu nous procurer) possède une capacité d'absorption encore plus grande. Porphyrisé au mortier d'agate, puis mis au contact d'une solution titrée de car-

bonate alcalin, il peut fixer une quantité appréciable d'alcali. Au degré d'intensité près, son action rappelle alors celle de la silice gélatineuse ; nous supposons, en effet, que les particules s'hydratent, deviennent semi-colloïdales, et sont par cela même douées d'un pouvoir absorbant vrai : celui des colloïdes.

b) ACTION DES COLLOÏDES. — Ce sont *les composants colloïdaux* du sol, exclusivement, qui commandent l'absorption vraie ; et les variations observées d'un milieu à l'autre sont imputables à la nature même des colloïdes, à leur constitution et à leur abondance. Nous avons étudié, en 1899, le pouvoir absorbant comparé de la *matière argileuse* extraite de huit terres différentes. L'argile ayant été décoagulée par les acides, avant sa séparation d'avec le sable fin, nous étions en droit de supposer que les quantités d'alcali fixé, à égalité de poids, seraient sensiblement les mêmes dans tous les cas... Les expériences accusèrent des variations considérables, allant du simple au triple, et l'on sait maintenant que ces écarts dépendent surtout de la complexité des composants argileux.

De fait, si nous nous reportons aux essais relatés plus haut (p. 295), nous voyons que les mêmes proportions de substances colloïdales : silice gélatineuse, hydrate ferrique, alumine précipité, argile normale, etc., décomposent des quantités de carbonate de potasse comprises entre 2 et 15 pour 1000. Puisque l'argile agricole séparée physiquement représente un mélange de colloïdes en proportion très variable (l'électrolyse de la *suspension colloïdale* ayant prouvé que les particules ne se dirigent pas toujours vers le même pôle), il y a lieu d'admettre que l'abondance des colloïdes négatifs et positifs règle l'absorption des ions basiques et des ions acides contenus dans les solutions salines du sol.

D'autre part, on sait maintenant que la *floculation* ou la *coagulation* d'un colloïde donné dépend d'un *ion* particulier et qu'elle est toujours accompagnée d'une absorption plus ou moins intense... On a reconnu également que les colloïdes coagulés se prêtent à des échanges quand ils sont au contact direct des coagulants pour lesquels ils ont une plus grande affinité ou grâce auxquels ils pourront

revêtir une forme plus stable. C'est à ces différentes actions que nous croyons devoir attribuer les processus de décomposition chimique qui sont contraires aux lois de Berthollet.

Essayons maintenant de préciser sommairement le rôle des colloïdes. Dans une terre arable normalement constituée nous trouvons des *matières colloïdales* positives et négatives, d'origine minérale ou organique, et des *matières semi-colloïdales* dont les capacités absorbantes peuvent être très inégales. Au premier groupe, nous rattachons les fines particules complètement décomposées ou hydrolysées : silicate d'alumine hydraté (argile vraie), silice gélatineuse, hydrate de sesquioxydes (de fer et d'aluminium), matières humiques précipitées, etc... Le second groupe comprend les débris minéraux porphyrisés que les actions hydratantes ou hydrolysantes rendent comparables à l'argile par leurs caractères physiques et leur manière d'être à l'égard des électrolytes ou des agents coagulateurs.

Trois cas simples peuvent se présenter :

1° La solution ne contient que des sels minéraux;
2° La solution ne renferme que des colloïdes dissous ;
3° La solution est formée de colloïdes en suspension.

Dans le premier cas, les principes fertilisants seront absorbés par les colloïdes déjà floculés ou précipités, et l'absorption sera totale ou partielle, suivant la nature et le degré de saturation des corps réagissants à l'égard de l'électrolyte considéré. Dans les autres cas, il y aura floculation ou coagulation, sous l'influence de l'électrolyte, et entraînement partiel ou total du sel entier ou de l'un des constituants ; il est permis de supposer que la floculation des *suspensions colloïdales* est déterminée par les ions de sens électrique contraire. Nous n'envisageons pas l'hypothèse de solutions mixtes, étant donné qu'il existe rarement des matières colloïdales en dissolution ou en suspension à côté de sels électrolytes, — à moins que ceux-ci ne soient indifférents à l'égard de celles-là. — Il n'y a pas alors de précipitation immédiate, mais quand

un agent coagulateur apparaît ensuite dans la solution, le colloïde entraîne dans sa chute une partie des constituants de l'électrolyte neutre ou indifférent.

Ces notions succinctes donnent une idée suffisante des causes qui déterminent la modification des solutions au contact de la terre arable. Si les liquides changeaient simplement de concentration, au contact des particules, nous pourrions dire avec VAN BEMMELEN qu'il y a *adsorption* et ce phénomène est surtout le résultat d'une action physique. Dans le cas contraire, il se produit des combinaisons mal définies entre les composants colloïdaux et les sels : il y a *absorption* — les colloïdes jouant alors, dans la terre arable, toutes proportions gardées, un rôle analogue à celui du protoplasma des cellules vivantes.

Rôle des éléments. — Les composants essentiels du sol ne jouent pas le même rôle. Au point de vue physique, les *éléments originels,* suivant leurs dimensions, sont des agents de perméabilité ou de tassement ; les *éléments dérivés,* au contraire, sont surtout des agents de cimentation et d'agglutination. Au point de vue chimique, à l'exception du quartz, on peut les envisager tous comme des matériaux de réserve... Mais combien différentes sont leurs qualités ! Tandis que les sables, le calcaire et les débris végétaux constituent autant de *réserves passives,* l'argile, la matière noire et les enduits renferment, au contraire, des *réserves actives* immédiatement utilisables ou susceptibles de le devenir bientôt, par la seule intervention des actions dissolvantes et mobilisantes. L'argile et l'humus prennent ainsi une grande part dans l'ensemble des transformations chimiques du second degré ; ils sont à la fois, mais à des titres divers, éléments *correcteurs, conservateurs* et *distributeurs ;* ils sont aussi les facteurs déterminants de l'absorption, puisqu'ils se combinent aux bases alcalines et aux phosphates dissous.

Rôle de l'argile. — La terre arable contient de l'*argile non colloïdale*, pauvre en potasse, susceptible d'absorber encore des principes fertilisants en proportions variables, et de l'*argile coagulable* ou colloïdale dont les affinités d'absorption sont satisfaites à l'égard des alcalis (1). Nous admettrons que l'argile peut se présenter sous différentes formes correspondant au *silicate d'alumine hydraté*, au *silicate alumino-potassique* et au *silicate alumino-calcique*... Elle passe de la première à la deuxième forme en absorbant le carbonate de potasse avec dégagement d'acide carbonique (processus d'absorption) ; elle passe de la deuxième à la troisième forme par l'action mobilisante des composés calciques : la chaux se substituant à la potasse (processus de mobilisation). Sous cet état, elle n'aurait pas, selon nous, le même pouvoir d'agglutination.

A d'autres égards, l'argile doit être considérée comme un agent intermédiaire en raison même de son pouvoir absorbant et de la facilité avec laquelle elle abandonne la potasse sous l'influence des composés calciques dissous. Dès lors, l'équilibre d'absorption se trouvant rompu, elle pourra recouvrer ses facultés premières.

Pour concevoir cet important mécanisme, considérons un silicate d'alumine hydraté de composition définie. En présence du carbonate de potasse, il va se former, par le fait même de l'absorption, un silicate alumino-potassique (la dose de potasse étant toujours faible par rapport à celle d'alumine). L'eau qui circule dans le sol, chargée d'acide carbonique, de bicarbonate de chaux ou de composés calciques solubles : nitrates, chlorures, sulfates... réagit ensuite sur cette argile impure et lui enlève une partie ou la totalité de la potasse. Deux réactions sont à prévoir :

a) *L'acide carbonique seul intervient.* Il se fait alors du carbonate de potasse et de l'argile pure. Comme le

---

(1) Je suppose que l'argile colloïdale se rapproche du silicate alumino-potassique. J'ai d'ailleurs reconnu que l'addition de potasse ou de carbonate de potasse en augmente sensiblement la proportion.

phénomène est réversible, il s'établit une lutte entre deux actions contraires : l'action mobilisante et l'action absorbante, et si cette dernière l'emporte, il n'y aura pas, à vrai dire, de potasse libérée.

b) Les composés calciques seuls interviennent. Ici, la réaction n'est plus la même, et l'on peut supposer que la chaux se substitue à l'alcali pour former un silicate alumino-calcique. En ce cas, la potasse entre en circulation : elle est libérée pendant un certain temps. Si le milieu ne contenait pas d'argile pure, la réabsorption de l'alcali se produirait seulement à mesure que l'acide carbonique, réagissant sur le silicate alumino-calcique, libérerait la chaux en donnant naissance à du calcaire et à un silicate d'alumine hydraté.

Ainsi s'expliquerait le rôle des éléments argileux agissant comme intermédiaires, suivant un cycle de transformation comportant toujours les mêmes phases (1) :

1° Absorption de l'alcali par l'argile primitive avec formation de silicate alumino-potassique ;

2° Substitution de la chaux à la potasse avec formation de silicate alumino-calcique ;

3° Libération de la chaux par l'acide carbonique et formation d'un silicate d'alumine hydraté (retour à la forme primitive).

Rôle du calcaire. — Le carbonate de chaux intervient surtout comme agent de neutralisation, de saturation, de coagulation et de double décomposition. Il neutralise, en effet, les acides libres : acide humique, acides nitreux et

---

(1) Ces transformations, que j'ai suivies expérimentalement, donnent l'explication rationnelle de la mobilisation de la potasse. Si l'acide carbonique devait nécessairement libérer l'alcali, en formant du carbonate de potasse, celui-ci serait repris aussitôt par l'argile. Au contraire, si cette libération est l'œuvre des composés calciques, il y a substitution d'une base à l'autre, et le pouvoir absorbant reste satisfait jusqu'au moment où l'acide carbonique s'empare de la chaux pour former un carbonate non absorbable directement.

nitrique, etc., en apportant une base salifiable ; il coagule l'argile, quand il est dissous, et favorise ainsi la formation des agglomérats terreux et la perméabilité du sol ; à l'état de bicarbonate, il peut contribuer à la mobilisation de la potasse ; enfin, c'est lui qui rend possible, directement ou indirectement, le dédoublement des chlorures, des nitrates, des sulfates, des phosphates solubles, etc. Nous avons vu comment il provoquait la rétrogradation de l'acide phosphorique et concourait aux actions précipitantes. Cette énumération suffit pour montrer le rôle important du calcaire.

Rôle de l'humus. — On sait que la fertilité d'un sol dépend à la fois de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. A ce point de vue, l'humus — élément de correction, de désagrégation, de dissolution, d'absorption et de nutrition — joue un rôle prépondérant, capital. J'ai dit, à cet égard, tout ce qui pouvait offrir quelque intérêt; mais je n'ai pas insisté sur les services que les matières humiques nous rendent à titre d'*intermédiaire.* Que serait un sol sans humus ? Un corps sans âme, je veux dire sans vie ! Au sein de la terre arable, un double travail s'effectue : *travail de désagrégation* d'une part, *travail de mobilisation* de l'autre. Les actions désagrégeantes — dues surtout à l'eau chargée de gaz carbonique et de sels divers — se poursuivent sur les débris rocheux encore vierges ou très imparfaitement altérés. Les *actions mobilisantes* — provoquées par les mêmes agents — se portent sur les produits de la dégradation des roches qui ont, par une tendance nettement régressive, immobilisé temporairement les principes fertilisants rendus solubles pendant le premier travail.

Supposons que l'humus — source d'acide carbonique et d'azote — fasse totalement défaut : que se produira-t-il ? Le travail chimique sera suspendu ; il y aura chômage, et la fertilité s'en ressentira. Je vais plus loin ! J'admets que les *actions désagrégeantes* se manifestent seules : que deviendront alors les matériaux solubilisés ? Une partie sera retenue par l'argile qui jouit, on le sait, de *propriétés absorbantes,* tandis que l'autre fraction (peut-être la

plus importante) disparaîtra dans les couches profondes sous l'influence des eaux ; il viendra donc un moment où le sol sera frappé de stérilité par appauvrissement.

Je veux encore admettre que ces pertes ne se produisent pas, que la *désagrégation* et *l'absorption* s'équilibrent, se contrebalancent, — ou encore que celle-ci l'emporte sur celle-là, — quel agent, en ce cas, mobilisera les principes insolubilisés par les éléments argileux ? Oui, comment s'effectuera naturellement le travail de libération ? On objectera que les racines des plantes se chargeront de digérer ces principes ; mais est-on bien certain que cela suffirait pour obtenir de bons rendements ? Je ne saurais l'affirmer. Et c'est à ces différents titres que l'humus devient un corps précieux, car lui, du moins, s'il jouit aussi de propriétés absorbantes comme l'argile, n'immobilise que passagèrement les substances fertilisantes puisqu'il est appelé à disparaître sous l'influence des actions microbiennes.

Au reste, nous n'avons pas besoin d'escompter sa disparition — sauf pour utiliser l'élément azoté — car il cède à la plante les éléments minéraux qu'il contient. Dès lors, s'il abandonne l'acide phosphorique, la potasse, les oxydes de fer et d'aluminium, la silice même, son pouvoir absorbant n'est plus satisfait, et il peut fixer à nouveau les matières solubilisées ou mobilisées en excès. C'est ainsi que les substances humiques servent d'intermédiaire et contribuent puissamment au maintien de la fertilité.

Ajoutons, pour ne rien omettre, que l'humate de chaux peut favoriser certaines doubles décompositions.

Répartition des principes fertilisants. — Les qualités fertilisantes du sol ne dépendent pas autant qu'on le suppose de sa *richesse globale*. Elles sont étroitement liées à l'intensité des transformations chimiques et biologiques qui déterminent l'évolution progressive des matériaux alimentaires : azote, acide phosphorique, chaux, potasse, etc... Qu'importe, en effet, la richesse intrinsèque d'une terre donnée si les substances utiles restent frappées de passivité ?

L'essentiel, pour le cultivateur, c'est que le sol soit suffisamment actif et qu'il puisse mettre à la disposition des plantes les aliments dont elles ont besoin. Or, l'expérience montre qu cette condition est toujours satisfaite quand les *éléments dérivés* accusent le maximum de richesse... Il faut, en un mot, que les principes fertilisants se trouvent convenablement répartis (1).

Répartition de l'azote. — L'azote organique appartient exclusivement à l'humus brut et à ses dérivés immédiats : humates, humophosphates, etc... D'une manière générale, les matières organiques originelles, à égalité de poids, accusent une richesse moindre que les composants de la matière noire... De plus, on peut admettre que l'azote s'y trouve à l'état passif ou inerte. Les composés humiques dérivés, au contraire, mettent à notre disposition une richesse azotée immédiatement utilisable ou susceptible de le devenir bientôt.

Abstraction faite des débris végétaux, qui se séparent aisément par immersion, l'humus accompagne surtout les éléments fins (voir tableau p. 39) dont il constitue le revêtement ; l'argile en entraîne toujours d'assez fortes proportions.

J'ai étudié, il y a quelques années, la répartition de l'azote dans une terre franche provenant des environs de Douai. J'ai trouvé pour 100 des divers éléments :

	AZOTE POUR 100
Dans le sable grossier.	0,026
Dans le sable fin.	0,219
Dans l'argile brute	0,362

(1) Pour étudier cette répartition, on procède à la séparation des éléments par l'analyse physique, puis on dose sur chacun d'eux les composés métalliques et métalloïdiques en faisant usage des méthodes que nous avons précédemment décrites.

Le sol contenait 1,87 d'azote par kilogramme. En tenant compte de l'analyse physique, — c'est-à-dire des proportions respectives d'argile et de sable, — on peut évaluer à 31 °/₀ la fraction d'azote appartenant aux enduits de revêtement du limon restant encore en suspension dans l'eau après une demi-journée de repos.

Répartition de l'acide phosphorique. — On sait que dans les terres normalement constituées — dans celles surtout où l'humus abonde — l'acide phosphorique n'appartient pas intégralement aux composés minéraux : on en trouve toujours, mais en proportions variables, dans les *substances humiques* originelles ou dérivées. Et comme ces matières font partie intégrante de tous les sols normaux, ceux-ci contiennent inévitablement du *phosphore organique* et du *phosphore minéral*, dont il n'est pas sans intérêt de connaître les proportions si l'on veut apprécier les qualités fertilisantes et la richesse en acide phosphorique d'une terre donnée. Malheureusement les procédés analytiques ordinaires ne permettent pas de bien établir ce partage : les nombres obtenus sont trop faibles puisqu'une partie des *composés phospho-humiques* (1) échappe à l'action dissolvante des réactifs acides, ainsi que MM. Berthelot et André l'ont péremptoirement démontré.

Le phosphore contenu dans la terre, le terreau et les plantes, est à l'état de *phosphates* (solubles dans les acides) et de *composés phospho-conjugués* (solubles ou insolubles dans les alcalis). Dès lors, il convient de distinguer :

a) *l'acide phosphorique réel des phosphates préexistants* — que l'on sépare en traitant la terre, à froid, par un acide étendu non susceptible d'exercer une action oxydante sur les combinaisons éthérées ;

b) *l'acide phosphorique des composés conjugués ou éthérés* — que l'on dissout par traitement avec des solutions

---

(1) Voir mon étude sur *les Composés phospho-humiques du sol*, publiée dans « La Science agronomique », t. I, p. 4.

alcalines concentrées de potasse, après une ébullition prolongée.

c) *l'acide phosphorique des substances insolubles dans les réactifs alcalins et acides* — que l'on détermine par différence en retranchant de l'*acide phosphorique total* (1) la somme de *a* et de *b*.

En appliquant ces procédés de séparation, MM. Berthelot et André ont trouvé dans une terre de Meudon :

	POUR 1000 DE TERRE SÈCHE
Acide phosphorique total	2,92
Acide phosphorique préexistant (*a*) . .	1,09
Acide phosphorique conjugué (*b* . . .	0,80
Acide phosphorique spécial (*c*). . . .	1,03

On voit, par cet exemple, que la fraction de phosphore organique n'est pas négligeable et qu'elle peut même, dans certains sols, dépasser sensiblement la proportion de phosphore minéral.

Je n'ai pas étudié spécialement le partage de l'acide phosphorique ; mais les expériences de M. Th. Schlœsing (ce volume, p. 79) montrent nettement que ce composé suit la même progression : les éléments fins étant toujours plus riches que les autres... On peut donc admettre qu'une forte proportion d'acide phosphorique, dans les sols fertiles, doit appartenir à la matière noire et aux enduits humo-argileux qui revêtent les particules.

Répartition de la chaux. — Les composants du sol contiennent de la chaux à l'état de carbonate (calcaire), de sulfate (plâtre), de phosphate, de silicates et d'humates complexes. A titre d'indication, voici comment se répartit cette base dans une terre de Grignon :

---

(1) L'attaque par les acides concentrés et bouillants ne permettant pas d'obtenir l'acide phosphorique total ; il convient, au préalable, d'incinérer la terre dans un courant d'air ou d'oxygène, en ayant soin de faire passer les vapeurs sur une colonne de carbonate de soude. On évite ainsi toute perte de phosphore. L'analyse porte sur l'ensemble de la matière.

	POUR 100 PARTIES DES ÉLÉMENTS			
	Sable grossier	Sable fin	Argile brute	Terre sèche
Chaux carbonatée. . . .	6,363	2,350	»	2,504
Chaux silicatée	3,115	1,680	1,350	1,770
Chaux sulfatée	»	0,157	»	0,094
Chaux organique	0,082	0,135	»	0,106
TOTAL. . . .	9.560	4,322	1,350	4,474

Le sable fin séparé par lévigation et traitement aux acides étendus — suivant la méthode courante d'analyse physique — ne contient en réalité que de la chaux silicatée ; nous y joignons la chaux du calcaire terreux, du plâtre et des substances humiques (chaux organique), comme s'il s'agissait d'un *limon* naturel privé des éléments grossiers et de l'argile. Toutefois, en raison de la persistance des enduits, il serait plus rationnel d'admettre que les composants sableux et argileux entraînent de la matière noire et, par suite, de la chaux appartenant à des combinaisons organiques.

Répartition de la potasse. — En ce qui concerne la répartition de la potasse, je ne relaterai ici que les résultats obtenus avec une terre du champ d'expérience de Grignon, où les éléments fins dominent, et avec un sol granitique de la Creuse totalement dépourvu de calcaire. Bien que ces terrains accusent sensiblement la même richesse en potasse totale (8,53 et 8,94 °/₀₀), leur composition physique diffère considérablement. On y a trouvé en effet :

	POUR 100 DE TERRE FINE SÈCHE	
	Terre de Grignon	Terre de la Creuse
Sable grossier	17,2	44,0
Calcaire	4,6	»
Sable fin.	59,3	38,8
Argile.	16,8	4,5
Humus	1,6	12,7
	99,5	100,0

A l'analyse intégrale, ces minéraux ont donné des quantités très inégales de potasse ; tandis que le sable fin et l'argile l'emportent de beaucoup sur le sable grossier, dans la terre de Grignon, on observe précisément le contraire pour la terre de la Creuse : ici, c'est le sable grossier qui renferme le plus de potasse. La proportion d'alcali varie d'un sol à l'autre, d'ailleurs, pour chacune des substances considérées, mais elle diffère peu dans le sable fin et l'argile provenant d'une même terre.

Voici, du reste, les résultats observés :

	DOSE DE POTASSE POUR 100	
	Terre de Grignon	Terre de la Creuse
De sable grossier	0,864	1,33
De sable fin	0,994	0,58
D'argile	0,940	0,51

Tous ces nombres se rapportent à la matière minérale sèche, ce qui revient à dire qu'on a défalqué la proportion d'humus entraîné inévitablement dans la précipitation des éléments fins. Cette correction doit toujours être faite, pour les sols riches en matières organiques surtout, si l'on veut éviter toute cause d'erreur. On en comprendra la nécessité quand on saura, par exemple, que 100 parties de sable fin et d'argile de la terre granitique de la Creuse contenaient respectivement **16,8** et **49,2** de substances humiques.

Les écarts observés dans la répartition de la potasse deviennent encore plus apparents si l'on tient compte de la proportion réelle d'éléments mécaniques existant dans les sols en expérience. En rapportant les nombres trouvés, non pas à 100 parties de sable ou d'argile, mais au kilogramme de terre fine, on obtient :

	PROPORTION DE POTASSE POUR 1000 DE TERRE	
	Terre de Grignon	Terre de la Creuse
Dans le sable grossier	1,48	6,05
Dans le sable fin	5,88	2,25
Dans l'argile	1,58	0,23

Si nous cherchons maintenant, pour compléter ces données, comment 100 kilos de potasse se répartissent entre les divers éléments physiques contenus effectivement dans la terre, nous obtenons les résultats suivants :

	RÉPARTITION DE 100 KILOS DE POTASSE	
	Terre de Grignon	Terre de la Creuse
Pour le sable grossier	16,55	70,93
Pour le sable fin	65,78	26,37
Pour l'argile	17,67	2,70

La comparaison de ces nombres est particulièrement instructive. On voit immédiatement, et d'une manière très saisissante, les grandes variations qui peuvent se produire dans le partage de la potasse, même pour des sols également riches en cet élément. Dans la terre de Grignon, plus des 5/6 de la potasse totale se trouvent dans les éléments fins, et l'argile seule en prend la cinquième partie. Pour la terre de la Creuse, au contraire, c'est le sable grossier qui tient la tête : il renferme les 7/10 de la potasse du sol ; la fraction restante appartient au sable fin, car l'argile n'intervient que pour une bien faible part (2,7 °/₀ sur l'ensemble).

Au point de vue pratique, l'étude de la répartition des principes fertilisants présente un très réel intérêt. Il n'est pas indifférent, en effet, de savoir si l'azote, l'acide phosphorique, la potasse et la chaux — qui sont les agents essentiels de la fertilité — appartiennent à tel ou tel composant. Et si l'on veut bien admettre que l'activité chimique du sol s'exerce avec plus d'intensité sur les particules d'une extrême finesse, on comprendra aisément pourquoi les matériaux alimentaires du sable surfin, de l'argile et de tous les éléments dérivés (de nature colloïdale surtout), participent toujours plus efficacement à la pro-

duction des réserves assimilables et à la nutrition des végétaux.

Il conviendrait, en terminant cet ouvrage, d'insister sur l'inégale résistance des principes fertilisants et sur les transformations que subissent les engrais incorporés à la terre. Ces intéressantes questions trouveront place dans le second volume de la Chimie agrologique, qui est spécialement consacré à *la fertilisation du sol.*

ERRATA

Page 2, dernière ligne, lire : *des* éléments.
Page 10, renvoi (2), ligne 7, lire : *pour* le même parcours...
Page 29, ligne 21, lire : *recouvrent* de vastes étendues...
Page 39, tableau ligne 2, lire : Terre de *Neauphle*.
Page 74, ligne 21, lire : actions *désagrégeantes*.
Page 74, dernières lignes, la phrase continue : (sans décomposition chimique apparente) *pour* pouvoir...
Page 75, première ligne, nouvelle phrase : *Les* éléments...

ERRATA (*Suite.*)

Page 102, ligne 23, lire : *propriétés.*
Page 106, tableau, lire : *siliceux.*
Page 109, renvoi première ligne : *soient* (*P*).
Page 114, tableau 3me ligne, lire : *sorgho.*
Page 114, ligne 33, lire : *assimilation.*
Page 134, dernière ligne, lire : *calciques.*
Page 143, première ligne, lire : de *l'eau.*
Page 145, aux deux tableaux, lire : *50 gr. de terre.*
Page 189, ligne 23, lire : *suivantes* et non suffisantes.
Page 203, ligne 10, lire : *dénitrificateurs.*
Page 253, première ligne, lire : *assimilation.*
Page 253, ligne 14, lire : *contiendraient.*
Page 254, ligne 3, lire : *ont* obtenu.
Page 258, au tableau, lire : *chlorhydrate.*
Page 265, ligne 24, lire : *qui,* ligne 30 : *réactions.*
Page 268, ligne 17, lire : *fait.*

TABLE DES MATIÈRES

III. — Les composants du sol.

IV. — Les propriétés du sol.

V. — Les ferments du sol.

VI – La chimie du sol.

LA CHAPELLE-MONTLIGEON (ORNE). — IMP. DE MONTLIGEON. — 2-09.

AGENDAS SILVESTRE

Élégants carnets de poche à reliure souple et solide, avec fermoir élastique, pochette et crayon.

Prix : Reliure toile souple, **1** fr. **25**; reliure mouton, **2** francs.

N° 1. — **Agenda des agriculteurs et des viticulteurs.** Administration de l'agriculture. Mathématiques pratiques. Géométrie. Mécanique. Physique. Agriculture générale. Engrais. Plantes de grande culture. Prairies. Ensilage. Bétail. Hygiène vétérinaire. Industrie laitière. Sylviculture. Apiculture. Génie rural. Horticulture potagère. Arboriculture fruitière. Le cidre.

N° 2. — **Agenda des viticulteurs et des négociants en vins.**

N° 3.— **Agenda des agriculteurs et des industries agricoles.** Renseignements administratifs. Mathématiques pratiques. Géométrie. Mécanique Physique. Agriculture générale. Agriculture spéciale. Notions d'horticulture potagère. Notions d'arboriculture fruitière. Viticulture. Sylviculture. Industries agricoles. Vinification. Le cidre. Vinaigre. La bière. Industrie laitière. Bétail. Alimentation du bétail. Hygiène vétérinaire. Médecine vétérinaire usuelle. Basse-cour. Aviculture. Droit rural et administratif. Douanes. Hygiène domestique. Renseignements divers.

N° 4. — **Agenda des horticulteurs.**

N° 5. — **Agenda des Syndicats agricoles.**

N° 6. — **Agenda des éleveurs.**

N° 7. — **Agenda de la laiterie.**

N° 8. — **Agenda-buvard de bureau.** Grand-livre de comptes in-8°, reliure toile pleine. Prix : 2 fr. 50. — Le texte est imprimé sur des feuilles de papier buvard permettant le séchage instantané des notes et dépenses journalières inscrites sur des feuilles blanches — trois jours par page — placées en regard; le livre permet à l'agriculteur de tenir facilement et exactement sa comptabilité quotidienne; grâce aux nombreux tableaux appropriés aux diverses recettes et dépenses d'une exploitation agricole, l'agriculteur pourra, jour par jour, mois par mois, année par année, se rendre compte, à un sou près, des recettes et dépenses qu'il effectuera.

Sommaire : Services administratifs. — Le sol et les engrais. — Engrais. — Le bétail. — Industrie laitière. — Viticulture. — Vinification. — Sylviculture. — Horticulture et pomologie. — Génie rural. — Entomologie. — Economie et législation rurales. — Syndicats agricoles. — Transports. — Octrois. — Douanes. — Renseignements divers. — Comptabilité agricole.

ANNUAIRE DE L'AGRICULTURE

LIVRE VI. — *Tableaux officiels des foires et marchés agricoles.*

Dates, Nature et importance des transactions : Indication des réunions les plus importantes ; Nature et nombre des animaux amenés et vendus.

TROISIÈME PARTIE

Les Producteurs du Sol et leurs Auxiliaires.
Les Fournisseurs de l'Agriculture et de l'Exploitation.
Les Fournisseurs de l'Agriculteur et de sa famille.

LIVRE VII

Les Producteurs du Sol et leurs Auxiliaires.

TITRE I. — *Les produits naturels du sol.*

Les Grands Propriétaires (44,000 adresses).
Les Grands Vins de France.
Les principaux Viticulteurs (50,000 adresses).
Les Horticulteurs-Pépiniéristes.

TITRE 2. — *Les produits de l'Élevage.*

Anes et mulets (éleveurs d').
Animaux de basse-cour (éleveurs d').
Apiculteurs.
Bœufs, taureaux, vaches (éleveurs de).
Chevaux (éleveurs de).
Moutons, béliers, brebis (éleveurs de).
Ostréiculteurs.
Pisciculteurs.
Porcs, truies, verrats (éleveurs de).
Sériciculteurs.
Sériciculteurs-grainetiers.

TITRE 3. — *Les produits des Industries agricoles.*

Amidonneries.
Brasseries.
Chicorateries.
Cidreries.
Cireries.
Distilleries agricoles.
Eaux-de-Vie (Cognac et Armagnac)
Féculeries et Glucoseries.
Huileries et Savonneries.
Laiteries, Beurreries, Fromageries.
Malteries.
Raffineries.
Sucreries.
Vinaigreries.

LIVRE VIII

Les Fournisseurs de l'Agriculture et de l'Exploitation.

TITRE I. — *Préparation, culture, défense des produits naturels du sol.*

CHAPITRE I. — Amendements et Engrais.
CHAPITRE 2. — Fournisseurs de plants et semences pour les cultures.
CHAPITRE 3. — Fournisseurs de plants et semences pour le jardin potager et le jardin d'agrément.
CHAPITRE 4. — Fournisseurs de produits pour la défense des produits naturels du sol.

TITRE 2. — *Alimentation, entretien, défense des produits de l'élevage.*
TITRE 3. — *Amélioration et conservation des produits des industries agricoles.*
TITRE 4. — *Matériels agricole, horticole, viticole, avec noms des constructeurs, classés par spécialité.*
TITRE 5. — *Fournisseurs divers.*

LIVRE IX

Les Fournisseurs de l'Agriculteur et de sa famille.

Dumont (J.). Chimie agrologique :
I. La Terre arable. In-12, broché, 3. »; relié. . 3.75
II. La Fertilisation du sol. In-12 . . . . ». »
— Chimie végétale. In-12 . . . . ». »
— Techn iquedes engrais 4.50
— Engrais humiques . . . . 1. »
— Sols humifères. In-8°. 2.50
— Matières humiques du sol. In-8°. 2.50
— La pratique des fumures . . . . ». »
— Compte rendu des travaux effectués à la Station agronomique de Grignon. In-8°. . . . . . . 1. »
Dusuel et Legigan. Étude sur les mesures de hauteur. 1.50
Fontan. Élevage du porc. In-18. . . . . . . 1.25
Fron. Manipulations de botanique. In-8°. . . . ». »
Gherardt. Vers la fortune par les courses. In-18. 5. »
Ginieis. L'Hygiène du bétail. In-12 . . . . . ». »
Goussé. Le pays de Craon et ses porcs. In-18 . . 1. »
Gouttefangeas. Ruche claustrante. In-12 . . . . 3.50
Guittard. Pathologie bovine. In-8° . . . . . . 6. »
Guy. Culture de la tomate. In-12 illustré. . . . 1. »
Larue. Des rapports des machines avec les agriculteurs. 0.60
— Valeur fertilisante des excréments d'oiseaux . 0.75
Latière. Les Cultures fruitières de plein vent. In-12. 3. »
— Dans les vignes. In-12 . . . . 1.75
— Guide de l'expéditeur de fruits et primeurs. In-8°. ». »
Lavalou. Engrais liquides 0.75
Lesesne. Leçons d'agriculture. In-12, relié. . . 2.50
Léveillé. Flore de poche de la France. In-16, toile. 5. »
Lezé. Les Industries agricoles. In-12 . . . . . ». »
— Distillerie. In-12 . . . . ». »
Malpeaux. L'Agriculture du Nord. In-12 . . . . ». »
Marre (E.). Lutte contre la cuscute. In-8° . . . 1.25
Mermin. Conserve fermière :
I. Les fruits. — II. Légumes. — III. Viandes. Chaque volume 0.50

M. L. de G. Traité de botanique. In-18 . . . . . 2.50
— Traité de géologie et de minéralogie. In-18 . . 2.50
— Traité de zoologie. In-18 . . . . 2.50
Monographie des machines et des industries agricoles françaises. In-4° illustré 2.50
Moreau et Lesesne. Leçons d'agriculture. In-12. 2.50
Noter (R. de). L'Hybridation des plantes. In-12 . 2.50
— Plantes bulbeuses et tuberculeuses. In-12 . . 4.50
Pautet. Maladies contagieuses des animaux domestiques. In-12, broché, 3. »; relié. 3.75
Pérette. La Ferme des Rouges-Terres. In-8° . . 0.80
Potrat. Nouveau mode de taille rationnelle de la branche fruitière de la vigne. In-8° . . . . 1. »
Rampon. Ennemis de l'agriculture. In-8° . . . 6. »
Renault et Goussé. Le pays de Craon et ses porcs. In-12. . . . . 1. »
Rodillon. Incubation. In-8° 2.50
Rudolph. Plantes vivaces de pleine terre . . . 5. »
Silvestre (C.). Annuaire de l'agriculture. In-8°, relié. 10. »
— *Agendas* (Éditions de poche) :
— N° 1. Agenda des agriculteurs et des viticulteurs.
— N° 2. Agenda des viticulteurs et des négociants en vins.
— N° 3. Agenda des agriculteurs et des industries agricoles.
— N° 4. Agenda des horticulteurs.
Chaque exemplaire relié toile, 1.25, ou reliure mouton . . . . 2. »
— N° 5. Agenda-buvard de bureau. In-8°, relié toile. 2.50
Solanet. Chimie agricole. In-12 . . . . 3. »
Vacher (M). L'Industrie du porc. In-12. . . . . ». »
Van den Heede. L'art de forcer. In-12 . . . . 2.50
Vidal. Monographie de la ville d'Aimargues. In-8°. 3. »
Vieille-Cessay. Le Bon Cultivateur. In-8° . . . 1. »
Voitellier (H.). Les Mois avicoles. In-12. . . . 3.50

Bargeron (L.), Ingénieur-Agronome. *Le Commerce des engrais*. In-12. Prix . . . . **3 fr. 50**

Deliège (O ✿). *Les amis du Cultivateur*. Un volume in-8. Prix : **1** fr. **25.** — *Franco*. . . . . **1 fr. 50**

Dupont (M.), Médecin-vétérinaire. *La sante du cheval par les soins de la denture*. In-12 illustré. Prix. . **2** fr. »

Guittard. *Pathologie bovine. Étude pratique des maladies des appareils respiratoire, circulatoire.* In-8. » »

Lambl (Le Prof. Dr.). *La substance de la propriété rurale et la comptabilité agricole*. Ouvrage traduit en français par *M. Edange*. In-8. . . . . **1** fr. »

Lefèvre (Émile). *Histoire économique de la laine*. In-4. . . . . **20** fr. »

Le Hello. LE CHEVAL, *Aptitudes économiques et sportives*. In-12 illustré . . . . **5** fr. »

Mégnin (Pierre). *Les oiseaux utiles et nuisibles à l'agriculture*. In-8 illustré. Prix . . . . **4** fr. »

Pardé *Aide-Mémoire du Forestier*. Histoire naturelle (zoologie, botanique, géologie, lithologie). In-16, 219 pages. Prix net. . . . . **1 fr. 75**

Thary (Ex-professeur de maréchalerie à l'École militaire de Saumur). *La ferrure du cheval*. Un volume in-12 illustré. (*En préparation*). . . . . » »

Vacher (Marcel), Membre du Conseil supérieur de l'Agriculture. *Appréciation du Bétail dans les Concours* (Pointage, Tableaux, Mensuration). Un volume in-8 illustré. . . . . **2 fr. 50**


Encyclopédie de l'Agriculture
et des
Sciences agricoles
J. DUMONT
CHIMIE AGROLOGIQUE
LA TERRE
ARABLE
PARIS
CHARLES AMAT
Editeur.


UNIVERSITY OF ILLINOIS-URBANA
3 0112 068243713